



ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

RAPORTTEJA
RAPPORTER
REPORTS
2013:1

RAKENNUSFYSIIKAN TESTIVUOSIEN
SÄÄAINEISTOT HAVAITUSSA JA
ARVIOIDUSSA TULEVAISUUDEN
ILMASTOSSA
REFI-B-HANKKEEN TULOKSIA

KIMMO RUOSTEENOJA
KIRSTI JYLHÄ
HANNA MÄKELÄ
REIJO HYVÖNEN
PENTTI PIRINEN
ILARI LEHTONEN

**RAPORTTEJA
RAPPORTER
REPORTS
No. 2013:1**

551.588.74, 551.582.2

**Rakennusfysiikan testivuosisien sääaineistot
havaitussa ja arvioidussa
tulevaisuuden ilmastossa**

REFI-B-hankkeen tuloksia

**Kimmo Ruosteenoja
Kirsti Jylhä
Hanna Mäkelä
Reijo Hyvönen
Pentti Pirinen
Ilari Lehtonen**

**Ilmatieteen laitos
Meteorologiska Institutet
Finnish Meteorological Institute**

Helsinki 2013

ISBN 978-951-697-779-2 (nid.)

ISBN 978-951-697-780-8 (pdf)

ISSN 0782-6079

Unigrafia

Helsinki 2013



Julkaisija	Ilmatieteen laitos, (Erik Palménin aukio 1) PL 503, 00101 Helsinki	Julkaisuaika 2013
Kirjoittaja(t)	Kimmo Ruosteenoja, Kirsti Jylhä, Hanna Mäkelä, Reijo Hyvönen, Pentti Pirinen, Ilari Lehtonen	Projektin nimi REFI-B
Nimeke	Rakennusfysiikan testivuosien sääaineistot havaitussa ja arvioidussa tulevaisuuden ilmastossa - REFI-B-hankkeen tuloksia	

Tiivistelmä

Suomen vaihteleva ilmasto aiheuttaa rakennuksille monenlaisia ongelmia. Rakennusfysikaalisia tutkimuksia varten muodostettiin neljälle paikkakunnalle (Sodankylä, Jyväskylä, Jokioinen ja Vantaa) vuodet 1980-2009 kattava säähavaintotiedosto, joka sisälsi tunnin välein interpoloitua tietoa lämpötilasta, ilman suhteellisesta kosteudesta, tuulen suunnasta ja nopeudesta, auringon suorasta ja hajasäteilystä sekä sademäärästä. Sääaineistot luotiin Ilmatieteen laitoksen toteuttamassa "Rakennusfysiikan ilmastollisten referenssivuosien sääaineistot" (REFI-B) -hankkeessa, joka oli Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksen vetämän FRAME-hankkeen (Future envelope assemblies and HVAC solutions) rinnakkaishanke. Sääaineistojen pohjalta FRAME-hankkeessa valittiin kaksi rakennusfysiikan ilmastollista testivuotta (Jokioinen 2004 ja Vantaa 2007), joiden aikana sääolot olivat kosteusvaurioiden syntyä ajatellen tavallista hankalampia. Testivuosille muodostettiin erilliset säähavaintotiedostot tarkentamalla auringonsäteily- ja sademäärätietoja.

Sekä pitkät 30-vuotiset että molempien testivuosien sääaineistot muunnettiin kuvaamaan tulevaa ilmastoa ns. delta-menetelmän avulla. Muunnosmenetelmässä säämuuttujien tunnittaisia arvoja muokattiin sen mukaisesti, miten ilmastomallit ennustavat näitten kunkin muuttujan kuukausikeskiarvojen muuttuvan tulevaisuudessa. Lisäksi otettiin huomioon mallien ennustama lämpötilan keskihajonnan, sadepäivien määrän ja sateen intensiteetin sekä tuulen länsi- ja eteläkomponenttien muuttuminen. Sään havaittu vaihtelu päivästä toiseen sekä eri sääsuureitten väliset riippuvuudet säilyivät muunnoksessa havaitun kaltaisina. Toisaalta havaintoihin pohjautuvista ja tulevaa ilmastoa kuvaavista keinotekoisista aikasarjoista laskettujen keskilämpötilojen ja muitten tilastollisten suureitten ero vastaa mallien simuloimaa ilmaston muutosta, suureesta riippuen joko tarkkaan tai likimääräisesti. Tulevaisuutta esittävät aikasarjat muodostettiin kuvaamaan vuosien 2030, 2050 ja 2100 vaiheilla vallitsevaa ilmastoa. Raportissa esiteltävät ilmastoskenaariot perustuvat ns. SRES A2 -kehitysvaihtoehtoon, jonka mukaan kasvihuonekaasujen päästöt jatkaisivat kasvuaan koko tämän vuosisadan ajan.

30-vuotisten aineistojen perusteella laskettiin tuulen suuntien ja nopeuksien jakaumat joko ottaen mukaan kaikki havainnot tai vain ne tilanteet, joissa on satanut vettä tai räntää. Sadetilanteissa tuulet olivat tyypillisesti keskimääräistä voimakkaampia ja puhalsivat etelän suunnalta. Lisäksi todettiin sellaisten säätilanteitten, joissa vesi- tai räntäsadetta seuraa sään pakastuminen, harvinaistuvan tulevaisuudessa Etelä-Suomessa. Tätä tietoa voidaan hyödyntää tutkittaessa sääälle alttiiden betonirakenteiden vaurioitumisvaaraa.

Julkaisijayksikkö Ilmastonmuutos (ILM)

Luokitus (UDK)	Asiasanat
551.588.74	Ilmastonmuutos, delta-menetelmä, keinotekoiset
551.582.2	sääaineistot, rakennustekniikka, kosteusvauriot, FRAME-hanke

ISSN ja avainnimeke
0782-6079 Raportteja-Rapporter-Reports

ISBN	Kieli	Sivumäärä
978-951-697-779-2 (nid.)	suomi	48
978-951-697-780-8 (pdf)		



Utgivare	Meteorologiska institutet, (Erik Palméns plats 1) PB 503, 00101 Helsingfors	Datum 2013
Auktor(er)	Kimmo Ruosteenoja, Kirsti Jylhä, Hanna Mäkelä, Reijo Hyvönen, Pentti Pirinen, Ilari Lehtonen	Projektets namn REFI-B
Titel	Väderdata för byggnadsfysik för testår i det observerade och för framtidens uppskattade klimatet - resultat från projekt REFI-B	

Sammandrag

Finlands klimat är på många sätt problematiskt för byggnader. I denna undersökning framställde vi väderdata för byggnadsfysikaliska utforskningar vid fyra orter: Sodankylä, Jyväskylä, Jockis och Vanda. Varje väderfil innehöll data om en rad klimatvariabler (temperatur, relativ fuktighet, vindriktning och -hastighet, direkt och diffus solstrålning samt nederbörds mängd) under år 1980-2009, tidsmässigt interpolerade för varje timme. Väderdata bildades i projektet "Väderdata för byggnadsfysikaliska referensår" genomdriven av Meteorologiska institutet; detta var ett parallellt projekt för FRAME (Future envelope assemblies and HVAC solutions), som var lett av Tammerfors tekniska universitet. Med hjälp av dessa väderfiler valde man i FRAME-projektet två byggnadsfysikaliska testår (år 2004 i Jockis och 2007 i Vanda), under vilka det rådde särskilt kritiska väderförhållandena för uppkomsten av fuktskador i byggnader. För dessa testår bildades särskilda väderfiler genom en mer invecklad behandling av solstrålning- och nederbördsdata.

Såväl de långa trettioåriga som de korta testårväderfilerna förvandlades till det framtida klimatet med hjälp av den s.k. delta-metoden. I denna metod bearbetades observationsdata i enlighet med klimatförändringarna simulerade av klimatmodeller. Förutom månadsmedelvärden togs det hänsyn till de simulerade ändringarna i standardavvikelsen i temperaturvariationerna, antalet nederbördsdagar, nederbördens intensitet samt vindens syd- och västkomponent. Denna transformationsalgoritm bevarade kvalitativt väderlekens dagliga variationer och de olika vädervariablernas beroende av varandra som förekom i observationerna. Å andra sidan motsvarar skillnaden i medeltemperaturen och de andra statistiska variablerna emellan observationerna och de konstgjorda framtida väderfilerna de ändringar som simulerats med klimatmodellerna, antingen noga eller närapå. De konstruerade tidserierna bildades för klimatet, som uppskattas att råda kring år 2030, 2050 och 2100. Klimatscenarier som förevisas i denna rapport bygger på A2-scenariet, i vilket utsläpp av växthusgaser kommer att öka under hela det 21. seklet.

Med hjälp av de 30-åriga väderdata räknade vi fördelningen av vindriktningar och hastigheter, antingen genom att ta till hänsyn alla observationer eller endast sådana väderlekssituationer, då det har regnat eller slaskat. Under vått väder förekom typiskt hårdare vindar och vindriktningen var oftast sydlig. Härutöver märkte vi, att sådana väderlekssituationer, där kylan efterträder regn eller slaska, kommer att bli mer sällsynta i framtiden. Denna kunskap kan utnyttjas till exempel då man bedömer faran för fuktskador i betongkonstruktioner.

Publikationsenhet
Klimatförändringen (ILM)

Klassificering (UDK)
551.588.74
551.582.2

Nyckelord
Klimatförändring, delta-metoden, konstgjorda väderdata, byggnadsteknik, fuktskador, FRAME-projektet

ISSN och serietitel
0782-6079 Rapportteja-Rapporter-Reports

ISBN
978-951-697-779-2 (häft.)
978-951-697-780-8 (pdf)

Språk
finska
Sidantal
48



Published by	Finnish Meteorological Institute, (Erik Palménin aukio 1) P.O. Box 503, FIN-00101 Helsinki, Finland	Date 2013
Author(s)	Kimmo Ruosteenoja, Kirsti Jylhä, Hanna Mäkelä, Reijo Hyvönen, Pentti Pirinen, Ilari Lehtonen	Name of project REFI-B
Title	Weather data for building physics test reference years in the observed and projected future climate - results from the REFI-B project	

Abstract

The Finnish climate is rather demanding for buildings. In this study we produced weather datasets for four locations in Finland: Sodankylä, Jyväskylä, Jokioinen and Vantaa. The datasets, comprising years 1980-2009, contained the following variables relevant for building physics studies at hourly resolution: temperature, relative humidity, wind speed and direction, direct and diffuse solar radiation and precipitation. The datasets were created in the project "Climatological test years in Finland for building physics" (REFI-B) at the Finnish Meteorological Institute; a parallel project for FRAME (Future envelope assemblies and HVAC solutions) coordinated by Tampere University of Technology. On the basis of the 30-year datasets, two building physics test reference years (2004 for Jokioinen, and 2007 for Vantaa) were chosen in the FRAME project. During these test years, weather conditions were particularly critical for the emergence of damages due to moisture in buildings. Separate weather datasets were constructed for the two test years, by employing special treatment for the solar radiation and precipitation data.

Both the long tridecadal and the shorter test-year datasets were transformed to represent future climate by applying a delta-change method, where the hourly values of the relevant weather variables were modified in accordance with climate model projections. In addition to the projected changes in the monthly means of each variable, we considered projections for the standard deviation of temperature variations, the number of days with precipitation, precipitation intensity, and the southerly and westerly components of wind. The transformation algorithm preserves, in a qualitative sense, daily weather variations and the inter-variable dependencies occurring in the observational data. However, differences between the observational and modelled future weather datasets in the mean temperature and the other relevant statistical quantities are dependent on the climate model projections, either precisely or approximately. Artificial weather data were produced for climatic conditions expected to prevail in years 2030, 2050 and 2100. The climate scenarios displayed in this report are based on the A2 greenhouse gas scenario, according to which emissions would continue to increase during the entire 21st century.

Finally, the observational 30-year datasets were utilized to calculate statistical distributions for wind speed and direction. The procedure was repeated by considering merely those occasions in which precipitation had occurred in the form of rain or sleet. During wet weather, winds are typically fairly strong and the most common direction is southerly. Moreover, we noted that cases with rain or sleet being followed by frost are likely to become less frequent in the future. This piece of information can be utilized, for example, in assessing the likely risks of damage to weather-exposed concrete structures.

Publishing unit		
Climate Change (ILM)		
Classification (UDC)	Keywords	
551.588.74	Climate change, delta change method, artificial	
551.582.2	weather data, construction engineering, moisture	
	damages, FRAME-project	
ISSN and series title		
0782-6079 Raportteja-Rapporter-Reports		
ISBN	Language	Pages
978-951-697-779-2 (paperback)	Finnish	48
978-951-697-780-8 (pdf)		

Sisältö

1 Johdanto	9
2 Havaintoihin pohjautuva 30-vuotinen sääaineisto	11
3 Tulevaisuuden ilmaston 30-vuotiset sääaineistot	12
3.1 Aineistojen laatiminen	12
3.2 Ilmastosuureitten kuukausikeskiarvojen muutokset	17
3.3 Ilmastosuureitten frekvenssijakaumia	19
3.4 Menetelmien ja tulosten arviointia	22
4 Rakennusfysiikan ilmastollisten testivuosien havaintoihin pohjautuvat sääaineistot	24
5 Rakennusfysiikan ilmastollisten testivuosien sääaineistot tulevaisuuden ilmastossa	26
6 Sääaineistoja julkisivujen vaurioitumisen tarkasteluun	31
6.1 Tuuliruusut	33
6.2 Vesi- tai räntäsadetta seuraavat sään pakastumiset	33
6.3 Vesi- ja räntäsadepäivien lukumäärä ja näiden päivien sadesumma	36
7 Yhteenveto	36
Kiitokset	37
Kirjallisuusviitteet	38
Liite 1: Sademäärän muuntaminen tulevaisuuden ilmastoon	40
Liite 2: Ilmastosuureitten kuukausikeskiarvojen muutokset 30-vuotisesta aineistosta	45
Liite 3: Ilmastosuureitten kuukausikeskiarvojen muutokset testivuosien säätietojen perusteella	48

1 Johdanto

Suomen ilmasto on rakennusten kannalta sangen vaativa. Yhtäältä talot pitää eristää kunnolla, jotta lämmitysenergiaa ei kuluisi hukkaan. Toisaalta viileä ja kostea ilmastomme altistaa rakennuksia kosteusongelmille, joitten estämiseksi on huolehdittava ilman riittävästä vaihtumisesta. Lisäksi lämpötilojen heilahtelu lämpö- ja pakkasasteitten välillä voi vaurioittaa sateitten kostuttamia ulkoseiniä.

Käynnissä oleva ilmastonmuutos osaksi helpottaa, osaksi vaikeuttaa näitä sään aiheuttamia ongelmia. Muuttuvan ilmaston ja lämmöneristyksen parantamisen rakennuksille aiheuttamia riskejä on tutkittu Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan laitoksen vetämässä FRAME-hankkeessa (Future envelope assemblies and HVAC solutions; Vinha ym. 2012). Tuossa vuosina 2009–2012 toteutetussa tutkimushankkeessa pyrittiin arvioimaan asuin- ja toimitilarakennusten energiankulutusta ja kosteuden tiivistymisongelmia ilmaston lämmitessä. Lisäksi selvitettiin ilmastonmuutoksen vaikutuksia sääille alttiiden betonirakenteiden vaurioitumisherkkyyteen (Lahdensivu ym. 2011a, 2011b; Lahdensivu 2012).

FRAME-hankkeen tarvitsemat sääaineistot laadittiin Ilmatieteen laitoksen toteuttamassa “Rakennusfysiikan ilmastollisten referenssivuosien sääaineistot” (REFI-B) -nimisessä hankkeessa. Hankkeessa tuotettiin säätietoja kuvaamaan sekä viime vuosikymmeninä vallinnutta että tulevaisuuden ilmastoa. Sääaineistot perustuvat havaintotietoihin ja ilmastomallien tuloksiin, ja säämuuttujien ajalliset vaihtetut on esitetty niissä tunnin välein.

Pääosa tästä raportista keskittyy rakennusten kosteusteknisissä laskelmissa tarvittavien sääaineistojen laadintaan ja aineistojen ominaisuuksiin. Aineistojen laatiminen käsitti seuraavat päävaiheet:

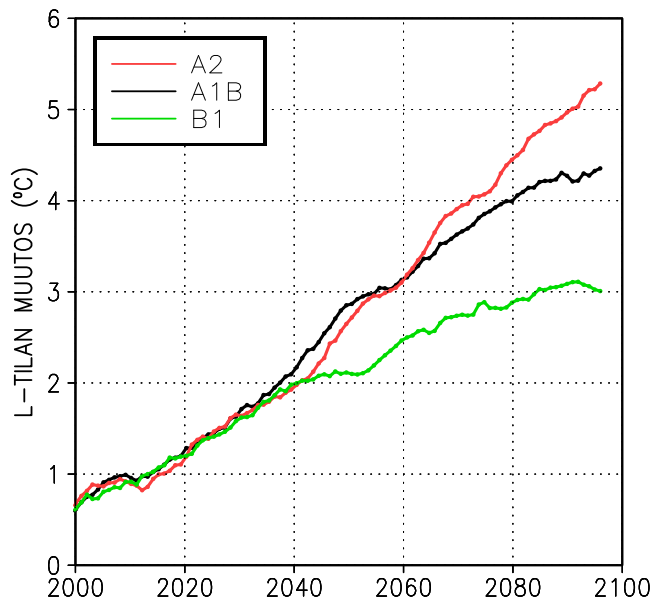
- Muodostettiin havaittua ilmastoa kuvaavat 30 vuoden säätietokannat neljällä havaintoasemalla (Vantaa, Jokioinen, Jyväskylä ja Sodankylä) vuosina 1980–2009 tehtyjen säähavaintojen avulla (luku 2).
- Laadittiin rakenteeltaan samanlaiset keinotekoiset 30-vuotiset säätietojen aikasarjat kuvaamaan sääolojen tilastollisia ominaisuuksia vuosien 2030, 2050 ja 2100 ilmastossa. Nämä aikasarjat muodostettiin muokkaamalla havaittuja säämuuttujien aikasarjoja ilmastomallien tulosten pohjalta (luku 3).
- Muodostettiin tarkennetut ja täydennetyt säätietojen aikasarjat kahdelle FRAME-hankkeessa valitulle rakennusfysiikan testivuodelle (Jokioisissa vuosi 2004 ja Vantaalla vuosi 2007). Näinä vuosina vallinneissa sääoloissa kosteuden rakenteisiin tiivistymisen vaara oli niin suuri, että se on vielä pahempi vain keskimäärin kerran kymmenessä vuodessa (luku 4).
- Laskettiin näille kahdelle testivuodelle keinotekoiset tunnitaiset säämuuttujien aikasarjat vuosien 2030, 2050 ja 2100 arvioidussa ilmastossa ja verrattiin niitä havaintoihin pohjautuviin testivuosien säätietoihin (luku 5).
- Tuotettiin verkkosivusto, jonka kautta rakennusfysikaalisten testivuosien sääaineistot nykyisessä ja arvioidussa tulevaisuuden ilmastossa ovat vapaasti saatavissa. Sivuston osoite on <http://ilmatieteenlaitos.fi/rakennusfysiikan-ilmastolliset-testivuodet>.

Tässä raportissa esitettävät arviot tulevaisuuden ilmastosta laadittiin olettaen, että kasvihuonekaasujen päästöt jatkaisivat kasvuaan koko tämän vuosisadan ajan (melko pessimistinen ns. SRES-A2-kehitysvaihtoehto). Mikäli päästöjen kasvu saadaan taittumaan, ilmasto muuttuisi vastaavasti hitaammin, etenkin tämän vuosisadan lopulla (kuva 1). 30-vuotiset tulevaisuuden ilmastoaineistot muodostettiin myös kahdelle muulle kuvassa 1 esitetylle skenaariolle (A1B ja B1), vaikka niitä ei FRAME-hankkeissa käytettykään.

Rakennusten kosteusongelmien lisäksi FRAME-hankkeessa tutkittiin myös lämmöneristyksen lisäämisen ja ilmastomuutoksen vaikutuksia rakennusten lämmitys- ja jäähdytysenergian kulu- tukseen. Tähän tarkoitukseen käytettiin rakennusten energialaskennan testivuosien sääaineistoja, joiden valintamenetelmää ovat kuvanneet Kalamees ym. (2012). Energialaskennan testivuosista on kerrottu “Rakennusten energialaskennan ilmastolliset referenssivuodet” (REFI-A) -nimisen rinnakkaishankkeen loppuraportissa (Jylhä ym. 2011). Energialaskennan testivuosien sääaineis- tot nykyisessä ja A2-ilmastonmuutosskenaarion mukaisessa tulevaisuuden ilmastossa ovat saa- tavissa <http://ilmatiiteenlaitos.fi/rakennusten-energiialaskennan-testivuosi> -verkkosivustolta.

Kolmas FRAME-hankkeen sää- ja ilmastotietoja hyödyntävä tutkimushanke tarkasteli raudoit- teiden korroosion ja betonin pakkasrapautumisen aiheuttamaa rakennusten julkisivujen vaurioi- tumista. Aiemmissä tutkimuksissa (Lahdensivu ym., 2011a; Lahdensivu, 2012) tähän tarkoituk- seen on käytetty ainoastaan havaintoihin perustuvia säätietoja. Tämän tutkimuksen yhteydessä luotiin uudet aineistot, joissa olivat mukana myös arviot tulevaisuuden ilmasto-olosuhteissa (lu- ku 6). Näitä tietoja on hyödynnetty Vinhan ym. (2012) työssä.

Sääaineistojen muodostamisessa käytetyt menetelmät olivat useimmille säämuuttujille oleelli-



Kuva 1. Etelä-Suomen alueen (n. 64. leveyspiiristä etelään) vuotuisen keskilämpötilan kohoami- nen vuosina 2000–2100 verrattuna jakson 1971–2000 keskiarvoon: 11 vuoden liukuvia keskiarvoja. Arviot perustuvat 19 maailmanlaajuisen ilmastomallin (Jylhä ym., 2009, liitteen 2 taulukko 6) tu- loksiin, ja ne on esitetty erikseen kolmelle kasvihuonekaasuskenaariolle: B1 - pienet päästöt (vihreä käyrä), A1B - melko suuret päästöt (musta käyrä) ja A2 - suuret päästöt (punainen käyrä). Kasvi- huonekaasuskenaariosta on kerrottu samaisen raportin liitteessä 5.

sesti samoja kuin mitä käytettiin REFI-A-hankkeessakin (Jylhä ym. 2011). Uutena säämuuttujana on nyt otettu mukaan sademäärä, johon kiinnitetään tässä raportissa erityistä huomiota.

2 Havaintoihin pohjautuva 30-vuotinen sääaineisto

Tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa muodostettiin tietokanta, joka koostui 1.7.1979 – 31.12.2009 välisenä aikana kolmen tunnin välein mitatuista säämuuttujien arvoista neljällä paikkakunnalla (Vantaa, Jokioinen, Jyväskylä ja Sodankylä). Tarkastellut meteorologiset suureet olivat ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus (mitattuina kahden metrin korkeudella), tuulen nopeus ja suunta (noin 10 metrin korkeudelta) sekä auringon kokonaissäteily ja auringosta tuleva hajasäteily vaakasuoralle pinnalle. Sää tietokanta sisälsi myös auringosta tulevan suoran säteilyn sädettä vastaan kohtisuoralle pinnalle (kahden edellä mainitun säteilysuureen avulla laskettuna; katso Jylhän ym. (2011) liitettä 3). Samoin se sisälsi alustavat arviot kolmen edellisen tunnin aikana kertyneestä sademäärästä.

Ilmatieteen laitoksen sää tietokantoihin tallennetut havainnot ovat käyneet läpi laatutarkastuksen, ja tarkastuksen paljastamat virheet on mahdollisuuksien mukaan korjattu. Tässä tutkimuksessa havaintoaineisto käytiin vielä uudestaan läpi puuttuvien havaintojen löytämiseksi, ja puuttuvat mittausarvot täydennettiin paikkakuntia lähellä sijaitsevien havaintoasemien tietojen avulla tai interpoloimalla puuttuva havainto edellisten ja seuraavien havaintojen avulla.

Suurelta osalta tarkasteltavaa jaksoa (vuodet 1979–2009) ei ole saatavissa automaattisia sademittauksia vaan ainoastaan havainnontekijän kaksi kertaa vuorokaudessa (kello 8 ja 20 Suomen normaaliaikaa) tekemiä sadeastiaan kertyneen veden (tai sulatetun lumen) mittauksia. Näin ollen sateitten tarkkoja alkamis- ja päättymisajankohtia ei tunneta. Havainnontekijä on kuitenkin kirjannut kolmen tunnin välein muistiin sekä havaintohetkellä vallinneen sään että edellisen päähavaintohetken (klo 2, 8, 14 ja 20 Suomen normaaliaikaa) jälkeen esiintyneet sääilmiöt. Vallitsevan sään tyyppejä on havainnonteko-ohjeissa kymmeniä, mutta yksinkertaistetusti sääilmiöt voidaan luokitella seuraavasti: tihkusade, vesisade, lumisade, räntäsade, vesikuuro, lumikuuro, raesade ja ukkonen sekä erilaiset poutaiset säätilanteet, joissa mitään mainituista sadeilmiöistä ei ole esiintynyt (Ilmatieteen laitos, 1986). Näitten säätilan luokittelujen avulla voitiin 12 tunnin aikana kertynyt sademäärä likimääräisesti jakaa neljälle kolmen tunnin jaksolle. Jyväskylän ja Sodankylän havainnoissa esiintyi lyhyitä ajanjaksoja, jolloin kertynyttä sadetta oli mitattu vain kerran vuorokaudessa, aamusella klo 8. Näinä ajanjaksoina sademäärän ajallinen vaihtelu voitiin arvioida vain hyvin karkeasti.

Menetelmä, jolla 12 tunnin aikana kertynyt sademäärä jaettiin kolmen tunnin sademääräksi, perustui ajatukseen etsiä havainnontekijän kirjaamien sääilmiöiden avulla ne kolmen tunnin jaksot, joitten aikana varmuudella ei ollut satanut ensinkään. Tässä etsinnässä oli otettava huomioon, oliko edellisestä päähavaintohetkestä kulunut kolme vai kuusi tuntia. Kun oli saatu eliminoitua varmat kolmen tunnin poutajaksot, mitattu sademäärä jaettiin tasan niille jäljelle jääville kolmen tunnin jaksoille, joiden aikana säätilaluokittelun perusteella oli varmasti tai ainakin mahdollisesti satanut.

Käytetty menetelmä aliarvioi poudan ja yliarvioi sateen kestoa. Niinpä se samalla keskimäärin aliarvioi sateen intensiteettiä sinä aikana jona on satanut, sillä todellisuudessa kaikki tai ainakin iso osa sateesta saadaan useimmiten paljon lyhyemmässä ajassa kuin koko 3–12 tunnin mittaisen

jakson aikana. Kahdentoista tunnin yhteenlaskettu sademäärä kyllä säilyy menetelmää käytettäessä täsmälleen havaintojen mukaisena, mutta kolmen tunnin sademäärien tarkempi arvioiminen ei ollut mahdollista, koska tiheämpivälisiä koko 30 vuoden jakson kattavia sadehavaintoja ei ollut olemassa.

FRAME-hankkeessa käytetyt laskenta-algoritmit — sekä testivuosien valitsemiseksi että varsinaisissa rakennusfysikaalisissa tutkimuksissa — edellyttivät lähtötietoinaan tunnin välein annettuja säämuuttujien arvoja. Tunnittaisen sääaineiston luomiseksi kolmen tunnin välein annettuja säämuuttujien arvoja interpoloitiin lineaarisesti ajan suhteen. Tuulen suuntaa ei kuitenkaan interpoloitu, vaan sille käytettiin aina lähimmän havaintohetken arvoa. Tyynessä tilanteessa sekä tuulen nopeus että suunta merkitään havainto-ohjeitten mukaan nolliksi. Kun tuulen nopeutta interpoloitiin kahden havaintohetken välillä, joista toisena sää oli ollut tyven, tuulen suunnalle käytettiin sitä arvoa, joka on havaittu näistä kahdesta havaintohetkestä sinä jona oli tuullut.

Kun FRAME-hankkeen rakennusfysiikan ilmastolliset testivuodet oli valittu, näiden vuosien tunnittaisia sääaineistoja tarkennettiin käyttäen hyväksi tunnin välein mitattuja auringon säteilysuureiden arvoja sekä 2000-luvulla tehtyjä säätutkamittauksia (luku 4).

3 Tulevaisuuden ilmaston 30-vuotiset sääaineistot

3.1 Aineistojen laatiminen

Vuosien 2030, 2050 ja 2100 tienoilla vallitsevaa ilmastoja kuvaavat keinotekoiset 30-vuotiset sääaineistot laadittiin kaikille neljälle paikkakunnalle käyttäen kolmea vaihtoehtoista kasvihuonekaasuskenaariota (A1B, A2 ja B1; kuva 1). Tulevaisuuden säätietoja muodostettaessa käytettiin ns. delta-menetelmää, jossa pohjana olivat havaintoihin perustuvat säämuuttujien aikasarjat (luku 2). Nämä aikasarjat muunnettiin ilmastomalliennusteitten perusteella vastaamaan arvioitua tulevaa ilmastoja.

Sademäärää lukuun ottamatta muunnoksessa käytetyt laskentamenetelmät olivat periaatteiltaan samoja kuin REFI-A-hankkeessa. Niitä on kuvattu yksityiskohtaisemmin kyseisen hankkeen loppuraportissa (Jylhä ym., 2011). Erona kuitenkin on, että toisin kuin REFI-A-hankkeessa, nyt lähtökohdaksi olivat koko 30-vuotisjakson 1980–2009 havaintotiedot. Myös osa malleihin pohjautuvista ilmastomuutosta kuvaavista parametreista laskettiin tässä hankkeessa aiempaa tarkemmin.

Muunnettaessa havaintotiedot vastaamaan tulevaa ilmastoja tarvitaan aluksi ilmastomallien tuloksista laskettu tieto, miten kukin ilmastosuure tulevaisuudessa muuttuu, eli ns. *ilmastonmuutospakote*. Nämä ilmastomuutospakotteet on jo osaksi laskettu aikaisemmissa tutkimuksissa monille suureille: keskilämpötila ja -sademäärä (Jylhä ym. 2009); suhteellinen kosteus ja auringonsäteilyn määrä (Ruosteenoja ja Räisänen 2013); sadepäivien lukumäärä ja sateen intensiteetti-indeksi (Lehtonen 2011; Lehtonen ym. 2013). Lämpötilan vaihtelujen keskihajonnat sekä keskimääräisen tuulivektorin ja skalaarisen tuulen nopeuden muutokset laskettiin varta vasten tätä tutkimusta varten.

Useimpien meteorologisten suureitten kuukausikeskiarvoille oli käytettävissä enimmillään 19 ilmastomallin simuloimia jatkuvia aikasarjoja vuoteen 2099 asti (Jylhä ym., 2009, liitteen 2 taulukko 6). Vuosia 2030 ja 2050 ympäröiviä 30-vuotisjaksoja 2015–2044 ja 2035–2064 kuvaavat muutokset saatiin laskettua suoraan näistä aikasarjoista, käyttäen mallitulosten keskiarvoa.

Vuoden 2100 ilmasto kuvaavalle jaksolle 2085–2114 arviot laskettiin ekstrapoloimalla jaksojen 1980–2009 ja 2070–2099 välistä muutosta ajassa eteenpäin; tässä käytettiin hyväksi yksinkertaisen ilmastomallin avulla simuloituja maapallon keskilämpötilan muutoksia. Laskentatapaa selitetään yksityiskohtaisemmin lämpötilan muunnosalgoritmin kuvauksen yhteydessä kohdassa 3.1(a).

Osa suureista piti laskea mallien tuottamien päivittäisten tietojen pohjalta, joita oli käytettävissä vain kolmelta erilliseltä ajanjaksolta. Tällöin ilmastomuutospakotteet v. 2030 ja 2050 ilmastolle laskettiin ajan suhteen interpoloimalla. Vuoden 2100 ilmastopakotteen laskemiseksi tarvittiin ekstrapolointia. Lämpötilan vaihtelun keskihajonnalle ekstrapolointi perustui yksinkertaisen ilmastomallin käyttöön, kun taas muille suureille (tuulisuuret ja sadeindeksit) käytettiin lineaarista ekstrapolointia vuotta 2091 ympäröivästä jaksosta ajassa eteenpäin. Käytännössä ekstrapolointimenetelmän valinnalla ei ole kovin suurta merkitystä lopputuloksen kannalta, koska ekstrapolointia tarvittiin vain yhdeksän vuoden pituiselle ajanjaksolle viimeisen skenaariojakson keskikohdasta eteenpäin.

Päivittäisiä tietoja käytettäessä alhaisen alueellisen laskentatarkkuuden ilmastomallit rajattiin laskelmien ulkopuolelle, ja ilmastomuutospakote laskettiin 9-10 mallin tulosten keskiarvona.

Vielä varoituksena käyttäjälle: vaikka tutkimuksessa käytetyn muunnosmenetelmän avulla saadaan näennäisesti tuotettua vuosia 2030, 2050 ja 2100 ympäröiville 30-vuotisjaksoille hetkellistä säähavaintotietoa tunnin välein, ei näitä tietoja luonnollisestikaan pidä tulkita ennusteina juuri kyseisille päiville ja tunneille. Yksittäisten simuloitujen arvojen sijasta pitää tarkastella koko 30-vuotisen aineiston tilastollisia ominaisuuksia.

(a) Lämpötila

Ilmastomallien tulosten mukaan keskilämpötilat kohoavat tulevaisuudessa kaikkina vuodenaikoina, mutta samalla etenkin talvella lämpötilan vaihtelu päivästä toiseen vaimenee. Jotta tulevaisuuden lämpötila-aineistoja laadittaessa saataisiin otettua huomioon molemmat ilmiöt, tunnittaiset lämpötilat (T_{ske}) vuosien 2030, 2050 ja 2100 ilmasto kuvaavien 30-vuotisjaksojen aikana laskettiin muokkaamalla jakson 1980–2009 tunnittaisia lämpötilahavaintoja:

$$T_{ske}(t) = T_{hav}(t) + \Delta\bar{T} + \left(\frac{\sigma_{T,ske}}{\sigma_{T,nyk}} - 1 \right) (T_{hav}(t) - \bar{T}_{hav}) \quad (1)$$

missä t on aika tunteina, T_{hav} havaintoihin perustuva hetkellinen lämpötila ja $\Delta\bar{T}$ ilmastomallien ennustama keskilämpötilan nousu suhteessa jakson 1980–2009 simuloituun keskilämpötilaan tarkasteltavana kalenterikuukautena. $\sigma_{T,nyk}$ ja $\sigma_{T,ske}$ ovat mallien simuloimat vuorokauden keskilämpötilojen keskihajonnat kunakin kuukautena perusjakson (1980–2009) ja tulevan jakson aikana (esim. 2035–2064), ja \bar{T}_{hav} on kunkin kalenterikuukauden keskilämpötila jakson 1980–2009 säähavaintoaineistosta laskettuna.

Lämpötilan muutos laskettiin siis samanlaisella laskentakaavalla kuin REFI-A:ssakin (Jylhä ym. (2011), kaava (7.1)). Kuitenkin kaavassa esiintyvä \bar{T}_{hav} on REFI-B:ssa kyseisen kuukauden keskilämpötila koko 30 vuoden jakson keskiarvona. Tämä on teoreettisesti elegantimpi laskutapa kuin REFI-A:ssa käytetty yhden yksittäisen kuukauden keskilämpötilaan perustuva. Tosin jos tuo yksittäinen kuukausi on keskilämpötilaltaan lähellä tavanomaista, jollaisia kuukausia REFI-A-hankkeessa nimenomaan pyrittiin valitsemaan, ei menetelmien välillä ole isoa eroa.

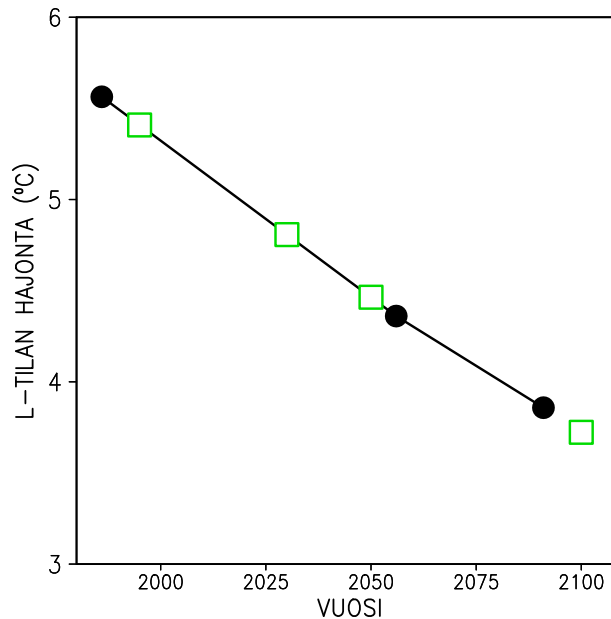
Ilmastomallien ennustama keskilämpötilan nousu $\Delta\bar{T}$ saatiin laskettua vuosien 2030 ja 2050 ilmastolle suoraan 19 ilmastomallin tulosten keskiarvona, erikseen kullekin kasvihuonekaasuskenaariolle. Vuodelle 2100 lämpeneminen laskettiin ekstrapoloimalla mallien vuodelle 2085 simuloimaa lämpötilan muutosta ajassa eteenpäin, olettaen että kullakin havaintopaikalla toteutuva keskilämpötilan nousun ajallinen kehitys on verrannollinen maapallon keskilämpötilan nousuun. Tällöin:

$$\Delta\bar{T}_{2100} = \frac{T_{2100}^g - T_{1995}^g}{T_{2085}^g - T_{1995}^g} \Delta\bar{T}_{2085} \quad (2)$$

missä T^g on rakenteeltaan yksinkertaisen MAGICC-ilmastomallin¹ (IPCC, 2001, liite 9.1; Raper ym., 2001) antama maapallon keskilämpötila alaindeksin mukaisena vuotena. $\Delta\bar{T}_{2085}$ taas kertoo 19 ilmastonmuutosmallin tulosten keskiarvona saatavan lämpötilan nousun jaksojen 1980–2009 (jonka keskimäinen vuosi on 1995) ja 2070–2099 (keskimäinen vuosi 2085) välillä havaintopaikkaa lähimmässä 2.5 x 2.5 asteen hilan pisteessä. Ilmastonmuutospakote laskettiin nytkin erikseen eri kasvihuonekaasuskenaariolle.

Lämpötilan päivittäisistä vaihteluista oli käytettävissä tietoa vain kolmelta jaksolta: 1971–2000, 2046–2065 ja 2081–2100. Havaintojaksoa 1980–2009 vastaava keskihajonnan arvo $\sigma_{T,nyk}$ saa-

¹Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change



Kuva 2. Päivittäisten lämpötilojen vaihtelun keskihajonnan inter- ja ekstrapoloiminen ajan suhteen. Mallien antamaa tietoa suureesta on tarjolla kolmelta jaksolta: 1971–2000 (keskimäinen vuosi 1986), 2046–2065 (2056) ja 2081–2100 (2091); nämä on merkitty kuvaan mustilla ympyröillä ja yhdistetty viivalla. Ajan suhteen interpoloidut keskihajonnat laskettiin vuosille 1995 (jakson 1980–2009 keskipiste), 2030 ja 2050 ja ekstrapoloitua vuodelle 2100 (vihreät neliöt). Vastaavalla tavalla interpoloitiin myös muut päivittäisten mallitietojen perusteella lasketut ilmastomuuttujat: tuulen komponentit ja skalaarinen nopeus sekä sadepäivien lukumäärä ja sateen intensiteettiindeksi.

tiin interpoloimalla lineaarisesti jaksojen 1971–2000 ja 2046–2065 välistä trendiä (kuva 2):

$$\sigma_{T,nyk} = \sigma_{T,1986} + \frac{1995 - 1986}{2056 - 1986}(\sigma_{T,2056} - \sigma_{T,1986}) \quad (3)$$

missä σ :n alaindeksissä esiintyvä vuosiluku viittaa kyseisen 20 tai 30 vuoden jakson keskimäiseen vuoteen.

Myös vuosien 2030 ja 2050 ilmastoa tarkasteltaessa lämpötilan vaihtelun keskihajonta saatiin interpoloimalla perusjakson ja ensimmäisen skenaariojakson tietoja ajan suhteen, samaan tapaan kuin kaavassa (3). Vuotta 2030 tarkasteltaessa eri kasvihuonekaasuskenaariot eivät vielä käytännössä poikkea toisistaan, ja tällöin käytettiin luonnollisesta vaihtelusta johtuvan hälyn pienentämiseksi kaikille skenaarioille samaa $\sigma_{T,ske}$:n arvoa: A1B-, A2- ja B1-skenaarioitten tulosten keskiarvoa (tässä suhteessa kuva 2 siis hieman yksinkertaistaa asiaa). Sen sijaan v. 2050 ilmastoa varten $\sigma_{T,ske}$ laskettiin erikseen kaikille kolmelle skenaariolle.

Vuoden 2100 ilmastoa tarkasteltaessa lämpötilan hajontaa jouduttiin ekstrapoloimaan viimeisestä simulointijaksosta eteenpäin:

$$\sigma_{T,2100} = \sigma_{T,2091} + \frac{T_{2100}^g - T_{2091}^g}{T_{2091}^g - T_{2056}^g}(\sigma_{T,2091} - \sigma_{T,2056}) \quad (4)$$

Ekstrapoloinnissa käytettiin siis skaalausta, joka nytkin perustuu yksinkertaisen MAGICC-mallin avulla laskettuihin maapallon keskilämpötiloihin T^g (vrt. kaavaan (2)). Tässä käytetty menetelmän muunnos olettaa, että lämpötilanvaihtelujen keskihajonnan voimakkuus vaihtelee samassa suhteessa kuin mitä maapallon keskilämpötila muuttuu. Myös $\sigma_{T,2100}$ laskettiin kaikille kolmelle kasvihuonekaasuskenaariolle erikseen.

(b) Suhteellinen kosteus

Tulevaisuuden ilmaston tunnitaiset suhteellisen kosteuden arvot laskettiin REFI-A:ssa kehitetyn iterointialgoritmin avulla (Jylhä ym., 2011, kaava (L10.1)). Nyt iterointia jatkettiin, kunnes koko 30 vuoden jakson keskimääräinen kosteus oli muuttunut prosenttiyksikön kymmenestuhannesosan tarkkuudella oikein. Säähavainto-ohjeiston mukaan suhteellinen kosteus ilmaistaan aina nestemäisen, pakkasasteilla siis alijäähtyneen, veden suhteen. Sen takia veden suhteen lasketut tulevan ilmaston tunnitaiset kosteusarvot sopeutettiin lopuksi vastaamaan uusia hetkellisiä lämpötiloja niin, että suhteellinen kosteus jään suhteen on se mitä iteroinnin tuloksena saatiin. Tätä suhteellista kosteutta (näennäisesti) kohottavaa korjausta tarvittiin ainoastaan lämpötilan ollessa pakkasen puolella.

Ilmastomuutospakotteena tarvittava malleihin perustuva arvio suhteellisen kosteuden muutokselle laskettiin vuosille 2030 ja 2050 mallitulosten keskiarvona. Vuodelle 2100 pakote saatiin ekstrapoloimalla; periaate oli sama kuin lämpötilallekin. Laskentatapaa on kuvattu Jylhä ym. (2011) liitteessä 10. Suhteelliselle kosteudelle saatiin käyttökelpoista tietoa vain seitsemästä mallista, joten muutosarvot ovat moneen muuhun suureeseen verrattuina epävarmoja (Ruosteenoja ja Räisänen, 2013).

(c) Tuuli

Tuulen suuntaa ja nopeutta muuttuneessa ilmastossa arvioitiin käyttäen samoja laskentakaavoja kuin REFI-A-hankkeessakin (Jylhä ym., 2011, liite 10). Raportin kaavoissa (L10.5a-b) esiintyvät tuulisuureitten kuukausikeskiarvot ovat kuitenkin nyt 30-vuotisia keskiarvoja. Menetelmän avulla saatavat tuulen skalaarisen nopeuden kuukausikeskiarvojen muutokset vastaavat tarkkaan malliennustuksia. Myös tuulen suuntien mallitetut muutokset saadaan otettua huomioon, joskin vain likimääräisesti.

Mallien simuloimaa tietoa tuulista oli saatavilla vain kolmelta 30-vuotisjaksolta (1971–2000, 2046–2065 ja 2081–2100; Gregow ym. 2012). Ilmastonmuutospakotteena toimivat tuulen länsi- ja eteläkomponenttien ja tuulen voimakkuuden muutokset laskettiin siksi samantyyppisesti kuin tehtiin lämpötilan vaihtelujen keskihajonnallekin (kuva 2); pakotefunktio vuodelle 2100 laskettiin kuitenkin nyt suoraan ekstrapoloimalla jaksojen 2046–2065 ja 2081–2100 välistä trendiä. Ilmastonmuutospakote laskettiin suoraan mallitiedoista vain A1B-skenaariolle, ja kahta muuta skenaariota vastaavat muutokset vuosille 2050 ja 2100 saatiin skaalaamalla näitä MAGICC-mallin tuottamilla maapallon keskilämpötilan T^g muutoksilla. Esimerkiksi A2-skenaariota vastaava skalaarisen tuulen nopeuden (V) muutos v. 2050 tienoon ilmastolle laskettiin

$$\Delta \bar{V}_{2050,A2} = \Delta \bar{V}_{2050,A1B} \frac{T_{2050,A2}^g - T_{1995}^g}{T_{2050,A1B}^g - T_{1995}^g} \quad (5)$$

Vastaavalla tavalla laskettiin niin ikään pakotteina tarvittavat tuulen länsi- ja eteläkomponenttien muutokset. Laskutapa tuottaa siten suurimman tuulen voimakkuuden muutoksen niille skenaarioille, jotka nostavat maapallon keskilämpötilaa eniten.

(d) Auringon säteily

Auringon säteilysuureitten muuntaminen uuteen ilmastoon tehtiin sekä samanlaisella laskentalgoritmeilla kuin REFI-A-hankkeessa (Jylhä ym., 2011, liite 10). Pakotteena muunnoksessa tarvittiin ainoastaan auringon kokonaissäteilyn muutos. Se laskettiin vastaavasti kuin keskilämpötilan muutoskin: vuosille 2030 ja 2050 suoraan mallituloksista ja vuodelle 2100 ajan suhteen ekstrapoloimalla käyttäen hyväksi yksinkertaisen ilmastomallin tuottamia maapallon keskilämpötiloja (kuten kaavassa (2)). Pohjana käytettiin ainoastaan 18 mallin tuloksia, koska yhden ilmastomallin tulostusaineisto oli talvella pohjoisilla alueilla virheellistä (Ruosteenoja ja Räisänen 2013).

(e) Sademäärä

Muunnettaessa tunnittaisia sademääriä tulevaan ilmastoon tarvitaan pakotteena mallien tuottamaa tietoa kolmen sadesuureen muutoksista:

- keskimääräinen kuukausisademäärä
- sadepäivien (sademäärä ≥ 1 mm/vrk) osuus kaikista päivistä
- keskimääräinen sademäärä kuukauden niinä päivinä, joina on satanut vähintään 1 mm (sateen intensiteetti-indeksi)

Kun näiden suureiden muutokset oli laskettu mallien tuloksista, muodostettiin arvio tulevaisuuden tunnitaisista sademääristä useassa vaiheessa. Ensin vähennettiin (joinakin kesäkuukausina) tai lisättiin (etenkin talvella) yli yhden millimetrin sadepäivien osuutta sen mukaisesti, mitä ilmastomallit ennakoivat. Sitten kuukausisademäärän ennustettu kasvu jaettiin sadepäivien ja lopulta sateisten tuntien kesken; ei kuitenkaan tasaisesti, vaan korottaen suuria vuorokausi- ja tuntisateita enemmän kuin pieniä. Menetelmän yksityiskohtaisempi kuvaus on esitetty tämän raportin liitteessä 1.

3.2 Ilmastosuureitten kuukausikeskiarvojen muutokset

Eri ilmastosuureitten kuukausikeskiarvojen muutokset Vantaalla, Jokioisissa, Jyväskylässä ja Sodankylässä siirryttäessä vuosien 2030, 2050 ja 2100 ilmastoon on esitetty liitteen 2 taulukossa 3. Taulukossa on tarkasteltu seuraavia suureita: lämpötila ja sen keskihajonta, suhteellinen kosteus, tuulen nopeus, auringon kokonaissäteily, suora säteily auringon sädettä vastaan kohtisuoralle pinnalle, hajasäteily ja sademäärä. Koska tuulen suunta ilmoitetaan asteina, sille ei ole mielekäästä laskea aikakeskiarvoja. Tuulen suuntien jakaumasta esitetään sen sijaan frekvenssijakaumia kappaleessa 3.3.

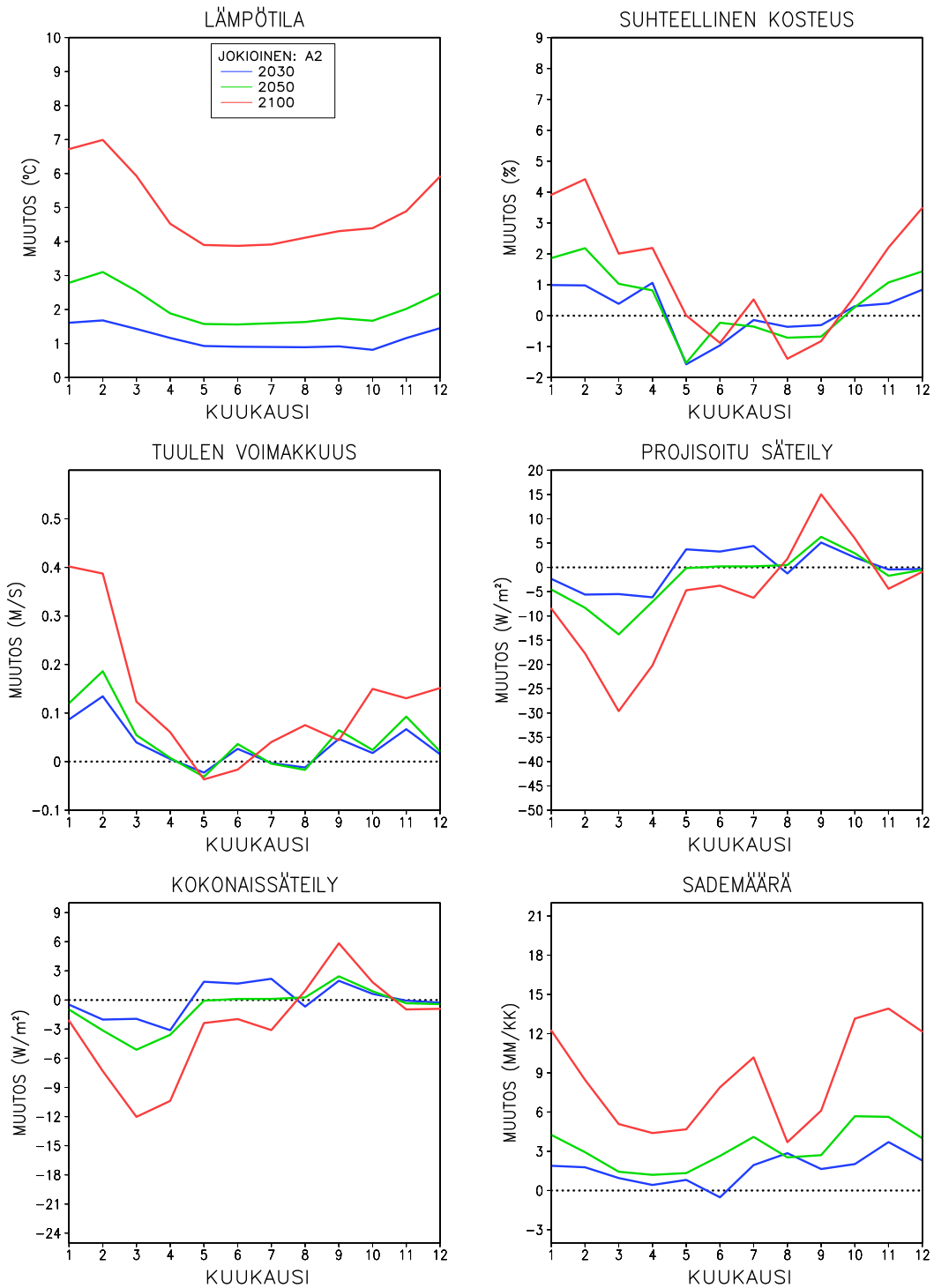
Havainnollisuuden vuoksi Jokioisten kuukausikeskiarvojen muutoksia on lisäksi näytetty myös kuvina (kuva 3). Vastaavat lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja projisoidun säteilyn muutokset kolmella muulla asemalla on esitetty Jylhän ym. (2011) raportin kuvissa 8.2, L11.4 ja L11.5. Laskentamenetelmän eroista johtuen noissa kuvissa esitetyt arvot kylläkin osaksi hieman poikkeavat tämän raportin tuloksista.

Muunnosalgoritmikaavaa (1) käytettäessä kuukausikeskilämpötilojen muutos määräytyy suoraan kaavaan sijoitetun malleihin perustuvan muutoksen ΔT perusteella. Keskilämpötilojen muutokset ovat täten viimeistä skenaariopaksoa lukuun ottamatta yksi yhteen samoja kuin mitä saatiin REFI-A-hankkeessa (Jylhä ym., 2011). Vuotuinen keskilämpötila nousee vuoteen 2030 mennessä runsaalla asteella, vuoteen 2050 yli kaksi astetta ja vuoteen 2100 viitisen astetta. Lämpeneminen on voimakkainta pohjoisessa. Eniten lämpötila kohoaa joulukuussa, kun taas keskikesällä lämpötilan nousu jää, poikkeuksena Jokioinen, alle puoleen talvikuukausien lukemista.

Lämpötilat vaihtelevat tulevaisuudessa kesää lukuun ottamatta nykyistä vähemmän. Marrasmaaliskuussa lämpötilojen keskihajonta putoaisi vuoteen 2100 tultaessa eri kuukausina ja eri paikkakunnilla 23–36% nykyisestä. Touko-elokuussa muutos on vain muutama prosentti jompaan kumpaan suuntaan.

Suhteellinen kosteus on sadan vuoden kuluttua talvisin 3–8 prosenttiyksikköä nykyistä korkeampi. Muutos on suurin pohjoisessa. Melkoinen osa tästä kosteuden kohoamisesta on laskennallista: lämpötilojen noustessa pitää alijäähtyneen veden suhteen laskettua kosteutta nostaa pakkasäällä vielä lisää, jotta jään suhteen laskettu kosteus muuttuisi sen mukaisesti kuin mallit ennustavat. Kesällä muutokset ovat pieniä, ja varsinkin etelässä kosteus jopa hieman putoaa. Keskimääräinen tuulen nopeus kasvaa marras-helmikuussa jonkin verran, tammikuussa etelässä vähän yli kymmenen prosenttia. Muina vuodenaikoina muutossignaali on heikko.

Auringon kokonaissäteilystä katoaisi vuoteen 2100 tultaessa talvikuukausina noin viidennes. Kesällä muutokset ovat pieniä, ja alkusyksyt muuttuisivat etelässä jopa hieman nykyistä valoisammiksi. Muutokset ovat suurimpia auringon sädettä vastaan kohtisuoralle pinnalle tulevassa



Kuva 3. Lämpötilan, suhteellisen kosteuden, tuulen nopeuden, auringon säteitä vastaan kohtisuoralle pinnalle saatavan suoran säteilyn, vaakasuoralle pinnalle tulevan kokonaissäteilyn ja sademäärän muutosten kuukausikeskiarvot Jokioisissa siirryttäessä perusjaksosta 1980–2009 A2-skenaariion mukaiseen vuoden 2030 (sininen käyrä), 2050 (vihreä käyrä) ja 2100 (punainen käyrä) ilmastoon. Huomattakoon eri asteikko suoraa ja kokonaissäteilyä esittävissä kuvissa.

suorassa säteilyssä, hajasäteilyssä taas selvästi pienempiä. Talvella säteilyä kylläkin saadaan hyvin vähän, joten isoiltakin vaikuttavat prosenttimuutokset ovat absoluuttisesti vähäisiä (kuva 3). Energiayksiköissä ilmaistuna säteily väheneekin eniten kevättalven ja kevään aikana.

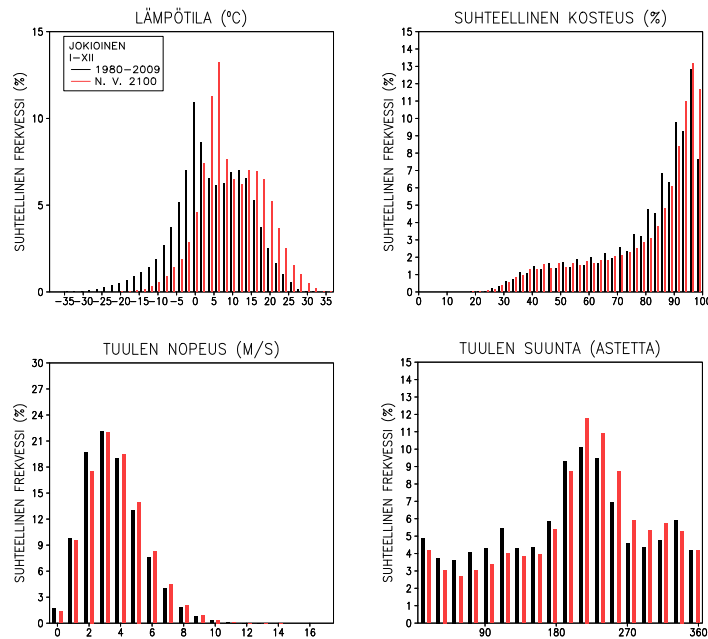
Koko vuoden yhteenlasketusta kohtisuoran pinnan suorasta säteilystä häviäisi vuoteen 2100 tullessa etelässä runsaat 5% ja pohjoisessa yli 10% (taulukko 3(f)). Hajasäteily vähenisi vain prosentin verran (taulukko 3(g)).

Sademäärä lisääntyy kaikkina vuodenaikoina, eniten talvella, jolloin lisäys on etelässä 30 ja Lapissa 40 %:n luokkaa. Kesällä ja alkusyksyn aikana muutokset ovat pienempiä, ja v. 2030 sademäärässä nähdään kesäkuussa jopa pientä vähenemistä. Tämä on tulkittava hälyn aikaansaannokseksi. Sademääräthän vaihtelevat sekä malleissa että luonnossa suuresti vuodesta ja vuosikymmenestä toiseen, joten itseisarvoltaan pienet muutokset eivät yleensä ole tilastollisesti merkitseviä.

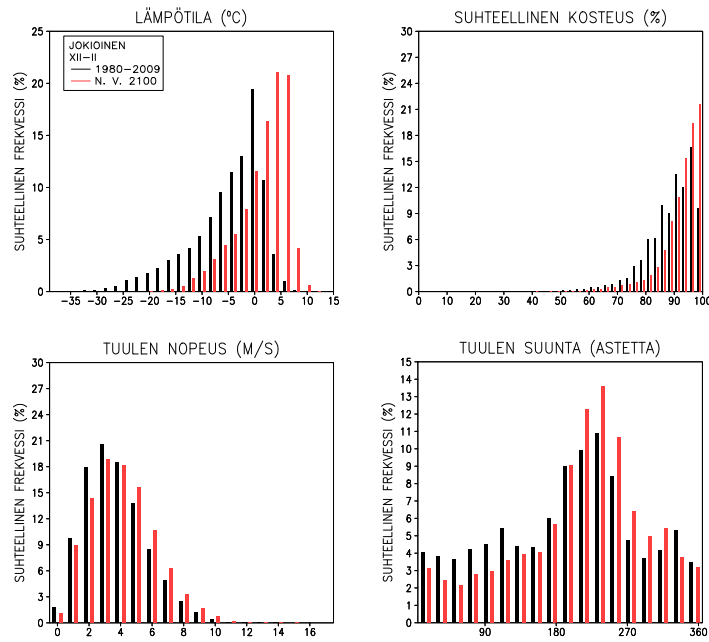
Kaikissa niissä tapauksissa, joissa muutossignaali on merkittävä, muutos etenee ajan suhteen monotonisesti, ts. muutos on itseisarvoltaan pienin v. 2030 ja suurin v. 2100 ilmastossa (kuva 3).

3.3 Ilmastosuureitten frekvenssijakaumia

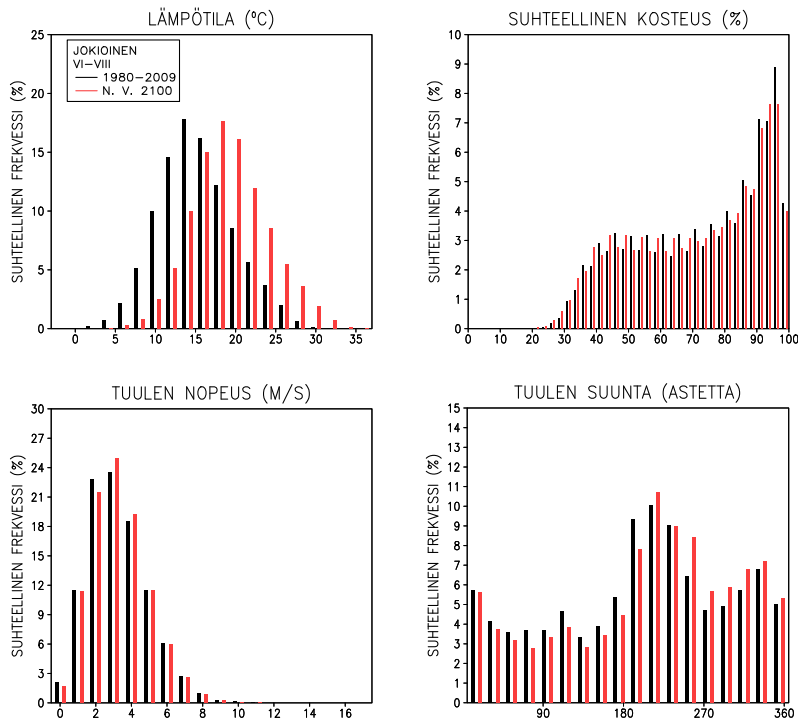
Aikasarjoista lasketut lämpötilan ja suhteellisen kosteuden sekä tuulen nopeuden ja suunnan frekvenssijakaumat Jokioisissa on esitetty kuvissa 4-6. Koska vuosisadan alkupuolella ja puolivälin tienoilla muutokset ovat vielä melko pieniä, frekvenssit on esitetty ainoastaan perusjaksolle



Kuva 4. Lämpötilan, suhteellisen kosteuden sekä tuulen nopeuden ja suunnan tunnitaiten arvojen suhteelliset frekvenssijakaumat (prosentteina) Jokioisissa 30-vuotisjakson 1980–2009 havaintotietojen perusteella (mustat pylväät) ja vuoden 2100 tienoilla vallitsevassa A2-skenaarion mukaisessa ilmastossa (punaiset pylväät); koko vuoden aineisto. Luokitteluväli on lämpötilalle 2°C, kosteudelle 2.5%, tuulen nopeudelle 1 m/s ja tuulen suunnalle 20°.



Kuva 5. Lämpötilan, suhteellisen kosteuden sekä tuulen nopeuden ja suunnan suhteelliset frekvenssijakaumat Jokioisissa perusjakson 1980–2009 havaintojen perusteella (mustat pylväät) ja vuoden 2100 ilmastossa (punaiset pylväät) jouluhelmikuussa.



Kuva 6. Lämpötilan, suhteellisen kosteuden sekä tuulen nopeuden ja suunnan suhteelliset frekvenssijakaumat Jokioisissa perusjakson 1980–2009 havaintojen perusteella (mustat pylväät) ja vuoden 2100 ilmastossa (punaiset pylväät) kesä-elokuussa.

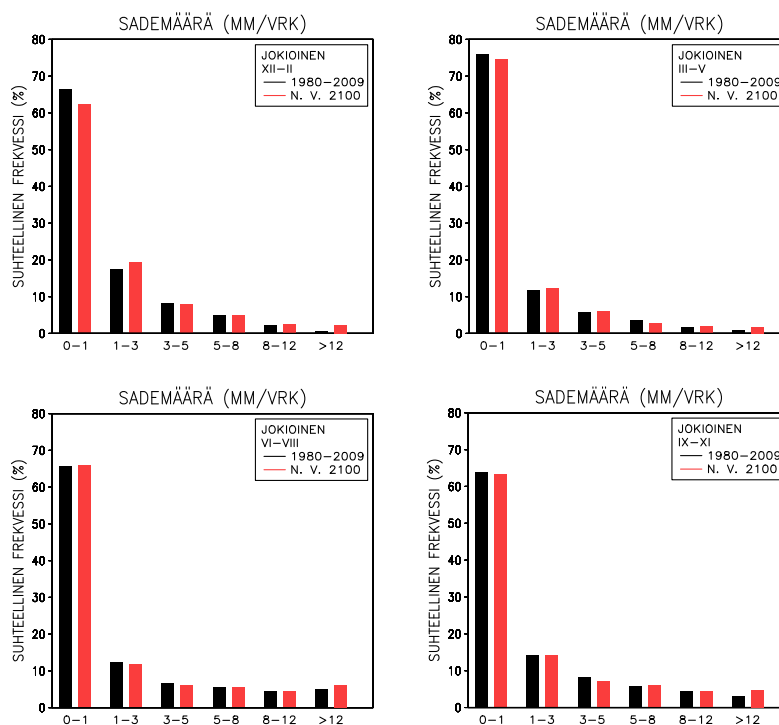
1980–2009 ja vuoden 2100 ilmastolle. Säteilysuureille frekvenssiesitys ei olisi yhtä havainnollinen, koska niille ylivertaisesti yleisin arvo on nolla, aina auringon ollessa maillaan.

Lämpötilojen jakauma siirtyy ilmaston muuttuessa odotetusti oikealle, samalla kun koko vuoden aineistossa ja erityisesti talvella vaihtelevaisuus vähenee. Ankarimmat pakkaset siis leudontuvat huomattavasti, mutta huippuhelteet eivät tukaloidu samassa suhteessa. Vuoteen 2100 tultaessa koko 30-vuotisjakson alhaisin lämpötila Jokioisissa kohosi muunnosmenetelmää sovellettaessa noin 16:lla, korkein lämpötila vain vajaalla viidellä asteella.

Suhteellisissa kosteuksissa talvisin 95 ja 100 %:n välillä olevat arvot selvästi yleistyvät alhaisempien kosteuksien kustannuksella. Tämä johtuu osaksi pakkasten heikentymisestä: kohtalaisella tai kovalla pakkasella näin korkeita alijäähtyneen veden suhteen laskettuja kosteuksia ei ole mahdollista esiintyä (ks. kpl. 3.1(b)). Kesällä suhteellisen kosteuden muutokset ovat pieniä.

Tuulen voimakkuuksien jakauman muutokset ovat vähäisiä. Talvisin nähdään hienoista lisäystä kohtalaisissa ja kovissa tuulissa ($V > 4$ m/s). Samalla lounaan ja lännen puoleiset tuulet (suuntakulma 200–300°) yleistyvät pohjois-, itä- ja kaakkoistuulien kustannuksella. Kesällä tuulet puhaltavat tulevaisuudessa suunnilleen yhtä kovaa ja samoilta suunnilta kuin nykyisinkin.

Sademääriä tutkittaessa ei ole kovin mielekästä katsoa tunnin välein esitettyjä arvoja, sillä näin lyhyen aikavälin sademäärä on tavallisimmin pyöreä nolla. Sen asemesta kuvassa 7 on esitetty vuorokausisademäärien tilastollisia jakaumia. Jakaumien muutokset ovat selvimpiä talvella.



Kuva 7. Vuorokauden sadesumman suhteelliset frekvenssijakaumat (prosentteina) Jokioisissa jaksion 1980–2009 havaintotiedoista laskettuina (mustat pylväät) ja arvio vuoden 2100 tienoilla vallitsevassa A2-skenaarion mukaisessa ilmastossa (punaiset pylväät) eri vuodenaikoina (XII–II: talvi; III–V: kevät; VI–VIII: kesä; IX–XI: syksy). Luokittelu: 0–1 mm/vrk, 1–3 mm/vrk, 3–5 mm/vrk, 5–8 mm/vrk, 8–12 mm/vrk ja yli 12 mm/vrk.

Tuolloin sadepäivien määrä kasvaa, jolloin samalla sateettomiksi luokiteltujen päivien (sademäärä alle 1 mm/vrk) määrä luonnollisesti pienenee, käytännössä vajaalla kymmenellä prosentilla. Sellaiset päivät, joina sataa 1–3 mm, näyttävät lisääntyvän, mutta tämä voi olla laskentamenetelmästä johtuva keinotekoinen piirre. Kohtalaisen sateisia päiviä (3–8 mm/vrk) olisi tulevaisuudessa suunnilleen yhtä paljon kuin nykyäänkin. Runsassateiset päivät sitä vastoin lisääntyisivät, ja yli 12 millin vuorokausisademääriä esiintyisi muunnosmenetelmää sovellettaessa talvisin jopa lähes neljä kertaa niin usein kuin nykyään.

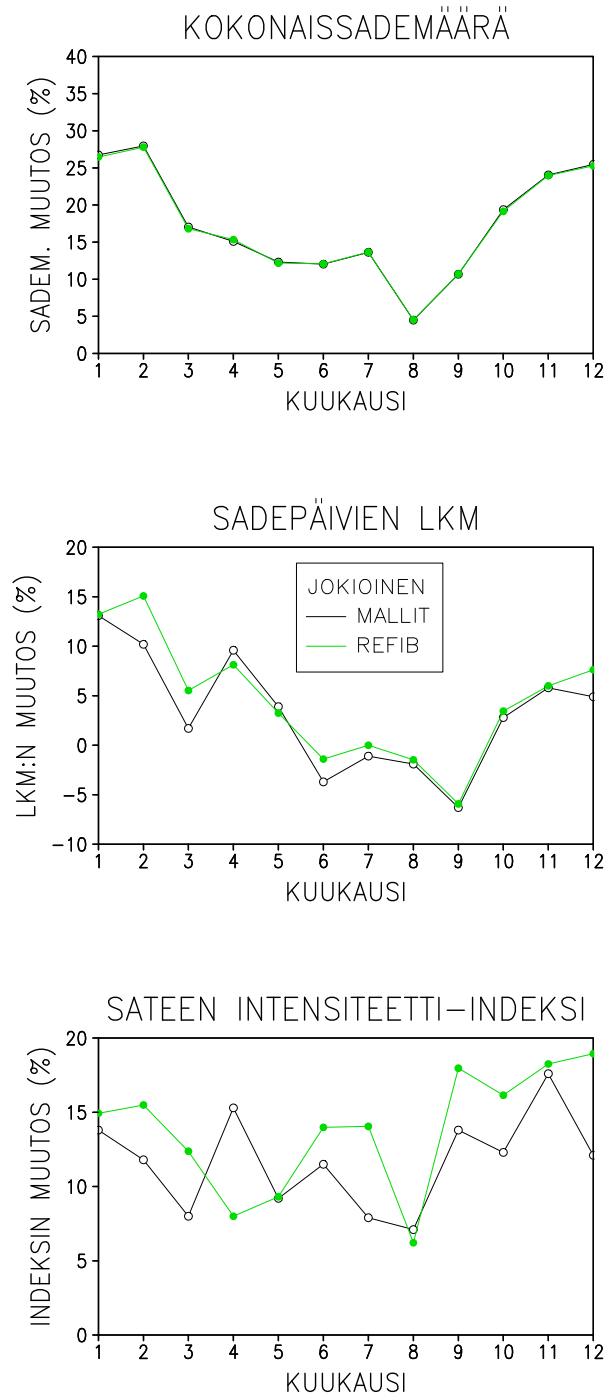
Muina vuodenaikoina muutokset ovat vähäisempiä kuin talvella. Varsinkaan kesällä eri frekvenssiluokkien osuudet eivät kuvan mukaan juuri muutu. Huomattakoon kuitenkin, että hyvin suurissa sademäärissä muutokset ovat suhteellisesti ottaen tuntuvampia. Esimerkiksi yli 30 mm/vrk sadepäivät lisääntyivät Jokioisissa kesällä noin 50 %:lla. Tällaisten hyvin suurten sademäärien absoluuttinen lukumäärä on kuitenkin niin pieni, ettei niitä ole mahdollista esittää samassa frekvenssikuvassa ylivertaisesti lukuisampien vähäsateisten päivien kanssa.

3.4 Menetelmien ja tulosten arviointia

Muille suureille kuin sademäärälle muunnosmenetelmien toimivuutta ja tulosten järkevyyttä on arvioitu jo REFI-A:n loppuraportissa (Jylhä ym., 2011). Päätelmät pitävät oleellisilta osiltaan paikkansa nytkin. Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden muunnokset toiminevat REFI-B:ssä hieman paremmin, koska muunnosta sovelletaan koko 30 vuoden aineistoon eikä vain yksittäisiin kuukausiin. Lämpötilan muunnoskaavassahan tarvittiin havaitun ilmaston keskimääräistä lämpötilaa, ja tällöin 30-vuotinen keskilämpötila on varmempi valinta kuin REFI-A:ssa käytetty yhden kuukauden keskilämpötila. Ero jää kylläkin pieneksi, jos tuo yksittäinen kuukausi on lämpöoloiltaan tavanomainen, mihin REFI-A:ssa pyrittiin. Myös kosteuden muuntamisessa pitkä aineisto on eduksi, koska silloin ei pahasti häiritse, vaikka jonakin yksittäisenä myöhäissyksyn tai talven kuukautena kosteus olisi koko ajan hyvin korkea. Vain tällaista yhtä kuukautta tarkasteltaessa olisi sen sijaan vaikea löytää riittävästi aikaintegroitua kyllästysvajausta, jotta mallien ennustama kosteuden kuukausikeskiarvon nousu voitaisiin siirtää tunnittaiseen sääaineistoon.

Kuvasta 8 nähdään, kuinka hyvin kolmen eri sadeindeksin muuntaminen uuteen ilmastoon on liitteessä 1 esitettyä menetelmää käytettäessä onnistunut verrattuna suoraan ilmastomalleista saatuihin arvoihin, joita oli käytetty algoritmin syöttötietoina. Algoritmi oli suunniteltu niin, että kokonaissademäärän muutos saadaan tulevaisuutta kuvaavista aineistoista täsmälleen samaksi kuin mallituloksissa (kuva 8 ylhäällä). Myös yli yhden millimetrin sadepäivien määrän muuntaminen uuteen ilmastoon onnistui kohtalaisen hyvin (kuva 8 keskellä). Sateen intensiteetin indeksissä on enemmän heittoa, niin että luoduissa sääaineistoissa muutos eroaa tyypillisesti muutamalla prosenttiyksiköllä tavoitellusta arvosta (kuva 8 alhaalla). Lievänä enemmistönä ovat sellaiset kuukaudet, joina sääaineiston sateet ovat muuttuneet mallien ennustuksiin verrattuina jonkin verran liian rankoiksi. Enimmillään heitot ovat 6-7 prosenttiyksikön luokkaa.

Lisäksi katsottiin, miten eri voimakkuusluokkiin kuuluvat sademäärät vähenevät tai lisääntyvät ilmaston muuttuessa. Tässä suhteessa yhteensopivuus mallitulosten ja keinotekoisten sääaineistojen välillä ei ollut kovin hyvä, kuten oli odotettavissakin. Mallit nimittäin simuloivat jo perusjaksolle liian vähän toisaalta aivan poutaisia ja toisaalta runsassateisia päiviä, kun niiden tuloksia verrataan havaintoihin (Lehtonen, 2011). Yksi syy tähän on, että malleissa tarkastellaan yksittäisten havaintopisteitten asemesta satojen kilometrien suuruisia hilaruutuja, mikä rajoittaa hyvin pienien ja hyvin suurien sademäärien esiintymistä.



Kuva 8. Kokonaissademäärän (yläkuva), sadepäivien lukumäärän (keskikuva) ja sateen intensiteetti-indeksin (alakuva) muutos vuoden eri kuukausina Jokioisissa siirryttäessä perusjak-sosta vuoden 2100 ilmastoon. Musta käyrä kuvaa kymmenen ilmastomallin tulosten keskiarvona saatua muutosta ja vihreä käyrä näyttää, miten hyvin vastaava muutos toteutuu tuotetuissa keino-tekoisissa sääaineistoissa.

Johtopäätös siis on, että muunnosalgoritmi tuottaa mallien simuloimat kokonaissademäärän ja sadepäivien lukumäärän muutokset varsin hyvin. Sateitten voimakkuudetkin muuttuvat kvalitatiivisesti oikein, eli kasvavat useimpina kuukausina 6-18 % ilman kovin selvää vuodenaikaista jakaumaa (kuva 8 alhaalla). Kvantitatiivisesti yksittäisille kuukausille tuotetuissa muutoksissa on kuitenkin epätarkkuutta.

Indeksien muutosten poikkeaminen toisistaan ei ole periaatteessa yllättävää, sillä sateen voimakkuuksia muuttava algoritmin osa oli melko yksinkertainen. Sateen voimakkuutta korotettiin likimain verrannollisesti havainnosta saadun sateen voimakkuuden neliöön, ensin vuorokausi- ja sitten tuntitasolla (liite 1). Tälle valinnalle ei ole olemassa mitään syvällistä teoreettista perustelua, mutta ei olisi ollut muunkaanlaiselle vastaavalle yksinkertaistetulle funktionaaliselle riippuvuudelle. Oleellisesti vastaavaa muunnosmenetelmää on kyllä käytetty Aaltosen ym. (2008) työssä.

Mallitulosten mukaan näyttäisi siltä, että tulevaisuudessa sadepäivät ryvästyisivät ainakin kesällä nykyistä voimakkaammin. Sadepäiviä olisi monta peräkkäin, ja niiden väliset poutajaksot vastaavasti pitenisivät. Tähän viittaa Lehtosen (2011) havainto, jonka mukaan kesällä Etelä-Suomessa poutapäivien lukumäärä ei juuri muuttuisi, mutta poutajaksot kuitenkin keskimäärin pitenisivät jonkin verran. Tällaista muutosta tässä raportissa käytetty muunnosmenetelmä ei osaa ottaa huomioon.

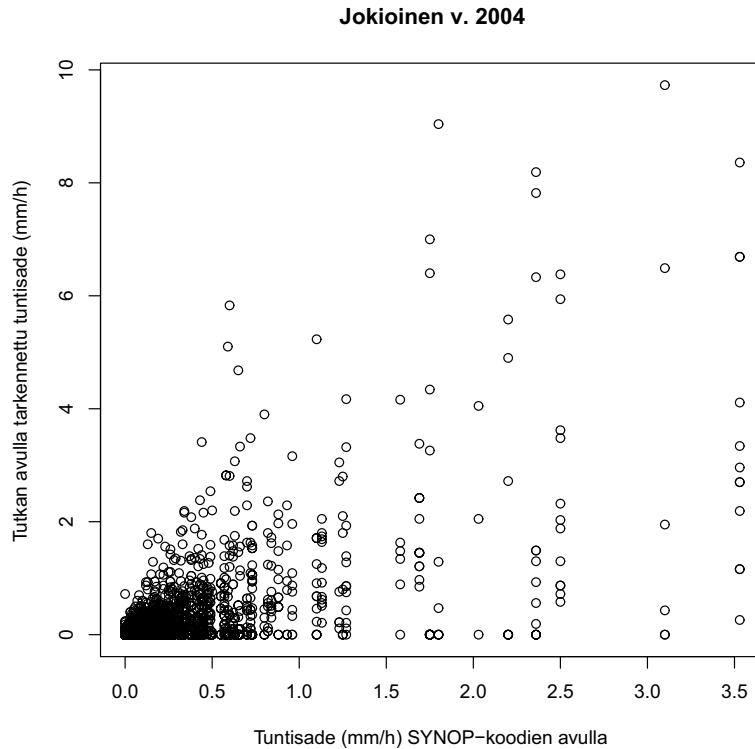
Mitä edellä kerrottiin sademäärän muunnosmenetelmän toimivuudesta, pätee silloin, kun tarkastellaan pitkää, esim. 30 vuoden mittaista havaintoajasarjaa. Lyhyitten aikasarjojen muuntamiseen menetelmä soveltuisi selvästi huonommin (liite 1, kappale L1.3).

4 Rakennusfysiikan ilmastollisten testivuosien havaintoihin pohjautuvat sääaineistot

FRAME-hankkeessa rakennusfysiikan ilmastollisten testivuosien sääaineistoiksi valittiin Jokioisten vuoden 2004 ja Vantaan vuoden 2007 säätiedot. Näinä vuosina sääolot olivat sellaiset, että homeen kasvun ja kosteuden rakenteisiin tiivistymisen vaara oli selvästi tavanomaista suurempi (Vinha ym. 2012). Valittujen testivuosien (Jokioinen-04 ja Vantaa-07) tunnittaisia säätietoja muodostettaessa lämpötilalle, suhteelliselle kosteudelle sekä tuulen suunnalle ja nopeudelle käytettiin samoja arvoja kuin kyseisinä vuosina oli 30-vuotisissa havaintoajasarjoissa (luku 2). Sademäärät ja auringon säteilyä kuvaavien suureitten arvot sen sijaan määritettiin tarkemmin.

Auringon kokonaissäteilylle ja hajasäteilylle käytettiin 30-vuotista aineistoa muodostettaessa mitattuja arvoja ainoastaan kolmen tunnin välein, ja näitten välisten ajanhetkien arvot oli interpoloitu lineaarisesti ajan suhteen. Testivuosien aineistoja luotaessa interpoloidut arvot korvattiin todellisilla tunnin välein tehdyillä mittauksilla. Sen jälkeen laskettiin uudet arvot hajasäteilyn varjostusrengaskorjaukselle ja suoralle säteilylle auringon sädettä vastaan kohtisuoralle pinnalle (Jylhän ym. (2011) liite 3).

Vielä merkittävämpi parannus oli säätutkamittausten käyttö tunnittaisia sademääriä arvioitaessa. Ilmatieteen laitoksen säätutkaverkoston mittausalue kattaa lähes koko Suomen, ja mittausten perusteella saadaan ajantasaista tietoa sadealueiden liikkeistä ja sateen voimakkuuksista. Säätutkilla mitattujen sademäärien absoluuttinen tarkkuus ei kuitenkaan ole yhtä hyvä kuin sääasemien sadepönttömittausten. Tutkilla mitattuja sademääriä on kuitenkin mahdollista tarkentaa



Kuva 9. Tutkahavaintojen avulla tarkennettujen (pysty akseli) ja säähavaintojen säätilakoodien avulla määrättyjen tarkentamattomien (vaaka-akseli) tunnitteisten sademäärien vertailua Jokioisten vuoden 2004 havaintotietojen pohjalta. Kukin pallura vastaa yhtä yhden tunnin aikana esiintynyttä sademäärää. Vaaka-akselilta voidaan lukea sademäärä ko. tunnin aikana sen mukaisena kuin se oli arvioitu havaintoaseman sademittausten ja havainnontekijän ilmoittaman säätilakoodin perusteella; näitä arvoja käytettiin 30-vuotisisissa aikasarjoissa (luku 2). Pysty akselilla on ilmaistu vastaava tutkahavaintojen avulla tarkennettu sademäärä, jollaista käytettiin testivuosiensa (Jokioinen-04 ja Vantaa-07) säätietoaikasarjoissa.

sademittarikorjauksen avulla (esim. Koistinen ja Michelson, 2002). REFI-B-hankkeen testivuosiensa sademääriä tarkennettaessa tämä toteutettiin niin, että tutkamittausten antamat tunnitteiset sademäärät normitettiin havaintoasemilla mitatuilla 12 tunnin sademäärillä. Tutkamittausten perusteella saatiin näin tarkka tieto, milloin oli ollut poutaa, milloin sadetta; lisäksi tutkat kertovat suhdelukuna, miten sateen voimakkuus on vaihdellut ajan kuluessa. Havaintoaseman mittauksen käyttö normituksessa taas varmisti, että 12 tunnin yhteenlaskettu sademäärä vastasi tarkkaan aseman sademittarilla mitattua arvoa. Tunnittaiset tutkalla mitatut sademäärät Jokioisissa v. 2004 ja Vantaalla v. 2007 poimittiin Ilmatieteen laitoksen tiesäämallin (Kangas ym., 2006) lähtötiedoista.

Kuvassa 9 on vertailtu tutkahavaintojen avulla tarkennettuja tunnitteisiä sademääriä vastaaviin 30-vuotisen aineiston sademääriin Jokioisissa vuonna 2004. Kuten olettaa voi, tutkatietojen avulla parannelluissa sadetiedoissa esiintyy suuria sateen intensiteettejä paljon enemmän kuin aiemmin luodussa tasoitettummissa aikasarjoissa. Tuon tiedoston mukaan vuoden 2004 suurimmat tunnitteiset sademäärät olisivat olleet 3.5 millimetrin luokkaa, kun tutkatiedot huomioon ottaen kaikkein sateisimpina tunteina vettä oli tullut lähes 10 mm. Tutkatiedon huomioimisen jälkeen myös sateettomien tuntien osuus vastaa aiempaa paremmin totuutta, eli v. 2004 Jokioi-

Taulukko 1. Testivuosien (Jokioinen-04 ja Vantaa-07) sääaineistot sisältävien tiedostojen rakenne. Samat sääsuureet ovat mukana myös 30-vuotisissa tiedostoissa.

Sarake	Suure	Selityksiä
1	Aika-askel	Ajanhetki "1" vastaa tammikuun 1. päivää klo 00:00 Suomen normaaliaikaa
2	Vuosi	Havaintoihin pohjautuvissa tiedostoissa todellinen vuosi, muutoin 2030, 2050 tai 2100
3	Kuukausi	
4	Päivämäärä	
5	Kellonaika	Suomen normaaliajan mukaisesti
6	Ilman lämpötila	Yksikkö °C
7	Ilman suhteellinen kosteus	Yksikkö % (nestemäisen veden suhteen)
8	Tuulen nopeus	Yksikkö m/s
9	Tuulen suunta	Asteina, 0: tyyni, 90: idästä, 180: etelästä, 270: lännestä, 360: pohjoisesta
10	Kokonaissäteily vaakapinnalle	Yksikkö W/m ²
11	Hajasäteily vaakapinnalle	Yksikkö W/m ²
12	R_{prj}	Yksikkö W/m ²
13	Sademäärä	Yksikkö mm/h

R_{prj} = Suora säteily auringon sädettä vastaan kohtisuoralle pinnalle

sisä 82 % kaikista tunneista oli täysin poutaisia, ilman tutkatietojen käyttöä vain 66 % (vastaava lukema Vantaalla v. 2007 oli 83 %, ilman tutkatietoja 63 %). Tunnittaisen sademäärien välinen korrelaatiokerroin verrattaessa alkuperäisiä ja tutkamittausten avulla tarkennettuja tietoja oli v. 2004 Jokioisten aineistossa 0.66 ja v. 2007 Vantaalla 0.68.

Valitettavasti ajallisesti kattavia digitalisoituja tutkamittauksia ei ole olemassa 30-vuotisen havaintojakson alkupuolelta, joten koko jakson käsittävän tiedoston sademääriä ei ollut mahdollista tarkentaa tutkatietojen avulla.

Auringon säteilyn määriin mittaustiedon tarkentuminen ei vaikuttanut yhtä voimakkaasti. Alkuperäisten ja tarkennettujen auringonsäteilymuuttujien aikasarjojen korrelaatiokerroimet olivat näinä kahtena testivuotena 0.98–0.99 (kokonaissäteily), 0.96–0.98 (hajasäteily) ja 0.94–0.95 (sädettä vastaan kohtisuora säteily).

Rakennusfysiikan ilmastollisten testivuosien sääaineistot nykyisessä ilmastossa ovat saatavissa hankkeen verkkosivulta <http://ilmatieteenlaitos.fi/rakennusfysiikan-testivuodet-nykyilmastossa>. Testivuosien säätiedostojen rakenne on kuvattu taulukossa 1.

5 Rakennusfysiikan ilmastollisten testivuosien sääaineistot tulevaisuuden ilmastossa

Testivuosien säätiedot muunnettiin kuvaamaan tulevaa ilmastoa samalla tavalla kuin kappaleessa 3.1 on kerrottu, käyttäen A2-skenaariota vastaavaa ilmastomuutospakotetta. Lämpötilan, suhteellisen kosteuden sekä tuulen nopeuden ja suunnan tunnittaiset arvot olivat täten täsmälleen samoja kuin vastaavissa 30-vuotisissa tiedostoissa on kyseisten vuosien kohdalla. Säteilysuureitten ja sademäärien arvot taas poikkesivat näistä, koska niille perustana käytettiin tarkennettuja

havaintoihin pohjautuvia arvoja (luku 4). Sademäärien muunnosalgoritmi tuottaa joissakin tapauksissa epärealistisia tuloksia, kun sitä sovelletaan pieniin aineistoihin (liite 1, kappale L1.3). Siksi testivuosien sademäärien muunnosta toteutettaessa ensin sijoitettiin testivuosien havaintoihin perustuvat tiedot isoihin tiedostoihin kyseisten vuosien kohdalle ja sen jälkeen muunnettiin näin saadut täysimittaiset 30-vuotiset aikasarjat uuteen ilmastoon. Näistä muunnetuista aikasarjoista poimittiin lopuksi testivuoden tiedot omiin tiedostoihinsa.

Testivuosien sääolot poikkesivat 30-vuotisjakson keskimääräisistä oloista, ja siksi havaittujen ja tulevaisuuden ilmaston testivuosien säämuuttujien keskiarvojen erotuksetkin olivat erilaisia (liitteen 3 taulukko 4). Esimerkiksi Jokioisten testivuoden 2004 joulukuu oli kostea ja leuto. Sen tähden keskilämpötila kohotetaan tulevaisuuden ilmastoon siirryttäessä hieman vähemmän kuin 30-vuotisaineistossa keskimäärin (taulukko 3(a)). Myös kosteus kohoaa vähemmän. Eroja nähdään muissakin suureissa.

Jokioisten testivuoden havaintoihin pohjautuvien säätietojen muuntamista tulevaan ilmastoon on havainnollistettu kuvissa 10-12. Luettavuuden helpottamiseksi hetkellisiä arvoja on esitetty vain yhden kuukauden mittaisille jaksoille äärivuodenaikoina: vuoden 2004 tammi- ja heinäkuulle.

Lämpötila (kuva 10) nousee kesällä kaikkina ajanhetkinä varsin tasaisesti, vuoteen 2100 tultaessa noin neljällä asteella. Tämä on sopusoinnussa taulukon 3(b) kanssa, jossa todettiin lämpötilojen vaihtelevuuden säilyvän kesällä jokseenkin entisen suuruisena. Talvella taas lämpötilaa on muunnosta toteutettaessa nostettu kaikkein kovimmilla pakkasilla yli kaksi kertaa niin paljon kuin sään ollessa leudoimmillaan. Esimerkiksi tammikuun 2–3. päivän tuimat pakkaset olisivat laskenta-algoritmin perusteella 10–12 astetta heikompia, mikäli samanlainen säätila toistuisi v. 2100 ilmastossa. Tämä luonnollisesti liittyy lämpötilan vaihteluitten pienentymiseen talvella (taulukko 3(b)). Kaikkein lauhimpina talvipäivinä lämpötilan nousu on viiden asteen luokkaa, mikä sekin on selvästi enemmän kuin kesällä milloinkaan.

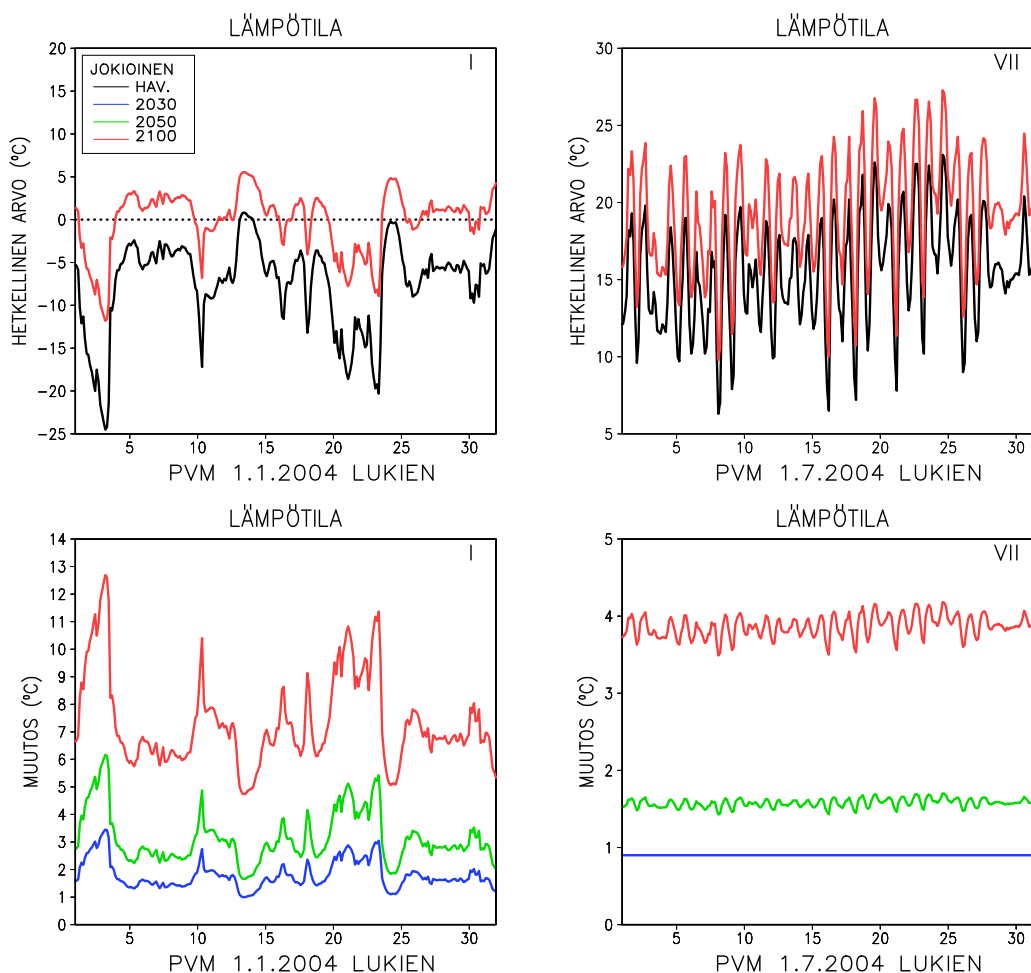
Muitten ilmastosuureitten muutokset ovat kesällä varsin pieniä, joten tässä keskitytään käsittelemään talvea. Suhteellista kosteutta laskennassa käytetty algoritmi kohottaa eniten verrattain kuivissa tilanteissa (kuva 11). Hetkellisen kosteuden lisäys on enimmillään 10 prosenttiyksikön luokkaa. Silloin kun kosteus on jo alun alkaen lähellä kyllästystilaa, sitä ei enää juuri ole mahdollista kohottaa. Kuvasta 11 nähdään myös muutamia ajanjaksoja, jolloin kosteus on vuoteen 2030 ja 2050 siirryttäessä jopa hieman pienentynyt. Nämä liittyvät tilanteisiin, jolloin havaintotietojen mukaan lähtötilanteessa on vallinnut ylikyllästystila jään suhteen — epätarkkaa mitaustietoa on tällöin jouduttu korjaamaan alaspäin ennen kuin se on voitu muuntaa kuvaamaan tulevaa ilmastoa.

Tuulet ovat uuteen ilmastoon siirryttäessä enimmäkseen hiukan koventuneet, enimmilläänkin kuitenkin vain noin metrin verran sekunnissa (kuva 12). Jos lähtötilanteessa on puhallellut idän tai pohjoisen kantilta, tuulen nopeutta on hiukan pienennetty. Näin on käynyt esimerkiksi tammikuun alkupäivinä. Muunnoksen ensimmäisessä vaiheessa nimittäin yksittäisten ajanhetkien tuulivektoreita muutettiin mallien ennustamalla tavalla, mikä talvisin johti koillisenpuoleisten tuulien heikkenemiseen ja lounaanpuoleisten tuulien voimistumiseen. Tämän jälkeen tuulen nopeudet vielä kalibroitiin niin, että skalaarisen tuulen nopeuden kuukausikeskiarvot koko 30 vuoden keskiarvoina muuttuivat tarkkaan mallien ennustamalla tavalla.

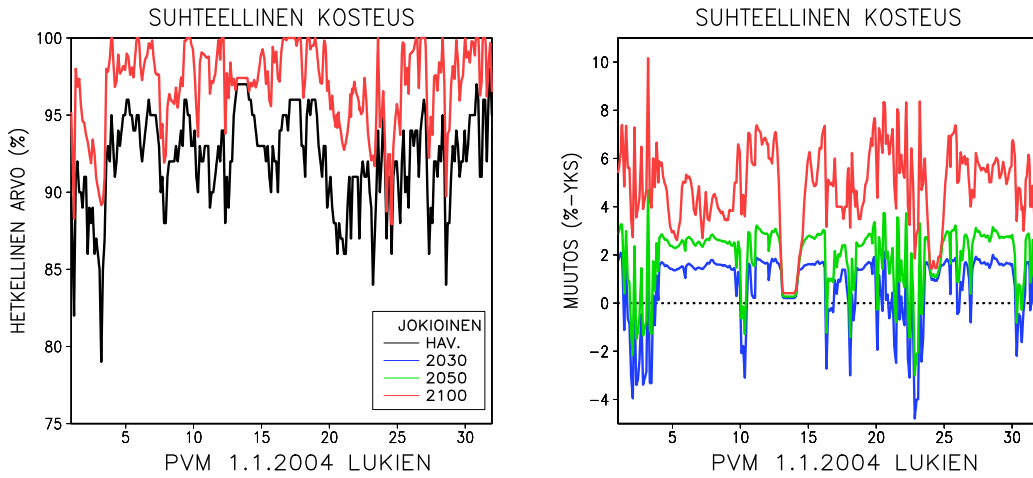
Yksittäisten ajanhetkien tuulen suunnat eivät useimmiten ole muuttuneet paljoa: v. 2030 ja 2050 yleensä vain muutaman asteen, v. 2100 välillä toki kymmeniäkin asteita (kuva 12). Muutamat hyvin suuret suunnan muutokset liittyvät tyypillisesti tilanteisiin, jolloin tuuli on ollut heikkoa, joten niitten käytännön merkitys on pieni.

Sademäärät vaihtelevat päivästä ja tunnista toiseen hyvinkin voimakkaasti. Havainnollisuuden vuoksi kuvassa 13 on sen takia tarkasteltu esimerkkinä kahta yhden vuorokauden mittaista ajanjaksoa. Vasemmassa kuvassa on esitetty lyhytkestoinen voimakas talviaikainen sade, joka sattui 4.2.2004. Tuolloin saatiin enimmillään sadetta n. 3 mm/h. Ilmastonmuutos kasvattaa helmikuun keskisademäärää hyvin voimakkaasti, vuoteen 2100 tultaessa lähes 30 % (taulukko 3(h)). Lisäksi sademäärien muunnosalgoritmi (liite 1) voimistaa suhteellisesti eniten kaikkein voimakkaimpia sademääriä. Molemmat seikat huomioon ottaen helmikuusen sateen intensiteetti on voimistunut v. 2100 enimmillään yli 1.5-kertaiseksi eli reiluun neljään millimetriin tunnissa. Edellisinä ja seuraavina tunteina esiintyneet heikommat sateet ovat voimistuneet suhteessa selvästi vähemmän.

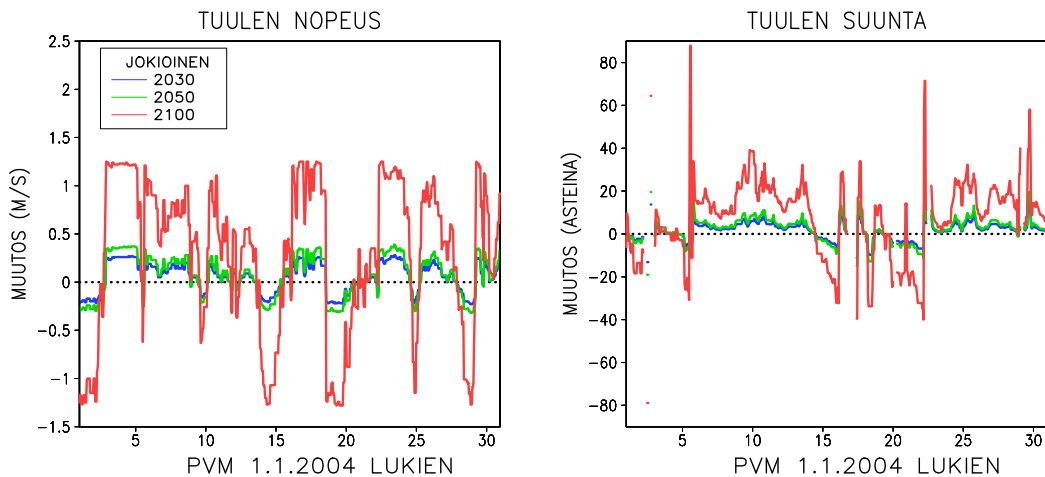
Esimerkki kesäaikaisesta sadetilanteesta on annettu kuvan 13 oikeanpuoleisissa kaavioissa. Vuoden 2004 heinäkuun loppupäivinä saatiin laajoilla alueilla Suomea runsaita sateita, ja Jokioisissa



Kuva 10. Yläkuvat: tunnittaiset lämpötilat Jokioisissa v. 2004 tammikuussa (vasen) ja heinäkuussa (oikea) havaintojen perusteella (musta käyrä) sekä vastaavien kuukausien lämpötilat muunnettuina vuoden 2100 A2-skenaariomukaiseen ilmastoon (punainen käyrä). Alakuvat: tunnittaisten lämpötilojen muutokset siirryttäessä näiltä perusjakson kuukaussilta vuoden 2030 (sininen käyrä), 2050 (vihreä käyrä) ja 2100 (punainen käyrä) ilmastoon.



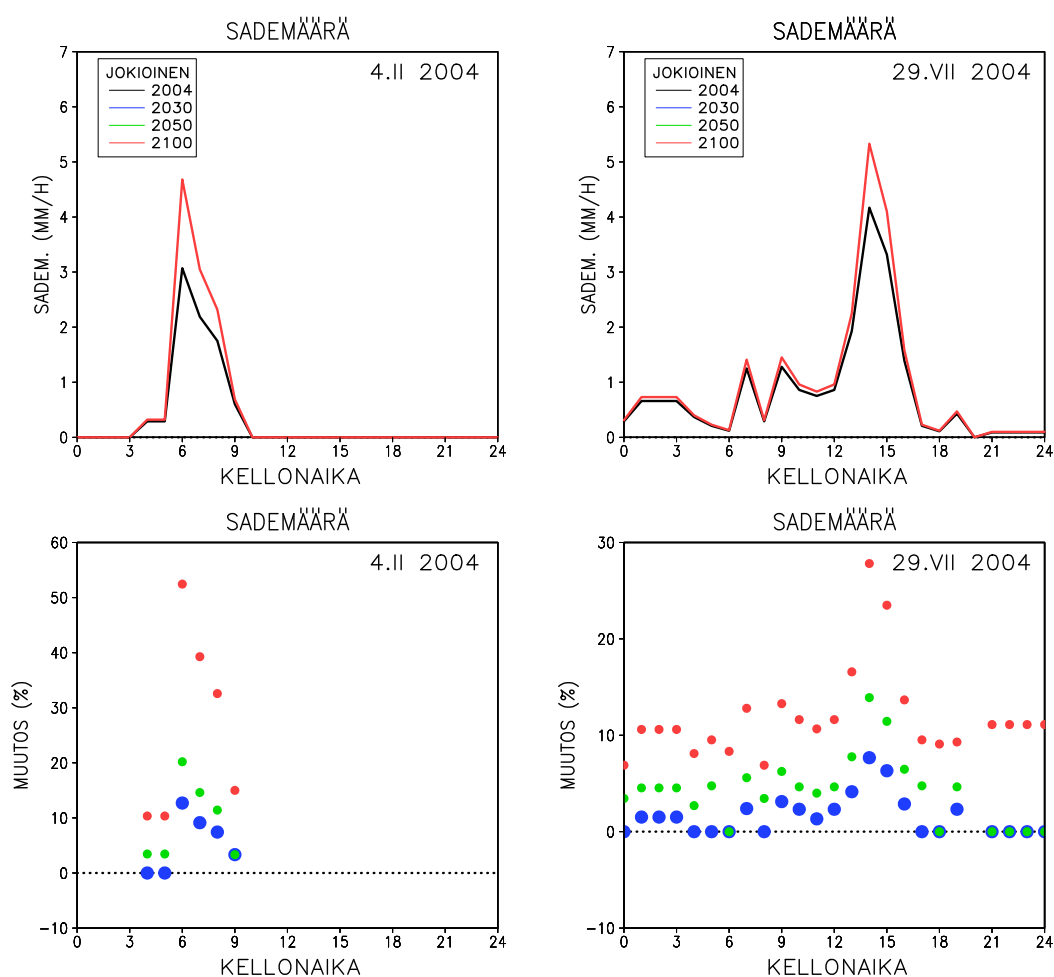
Kuva 11. Vasen kuva: suhteellisen kosteuden tunnitaiset arvot Jokioisissa vuoden 2004 tammikuussa (musta käyrä) sekä vastaavat arvot siirrettyinä vuoden 2100 (A2-skenaario) ilmastoon (punainen käyrä). Kansainvälisen meteorologisen ohjeiston mukaan suhteellinen kosteus lasketaan aina nestemäisen veden suhteen. Siksi pakkassäällä kyllästystila saavutetaan jo alle 100 % kosteudella. Oikea kuva: tunnitaiten suhteellisten kosteuksien muutokset, kun kosteudet on muunnettu kuvaamaan vuoden 2030 (sininen käyrä), 2050 (vihreä käyrä) ja 2100 (punainen käyrä) ilmastoa.



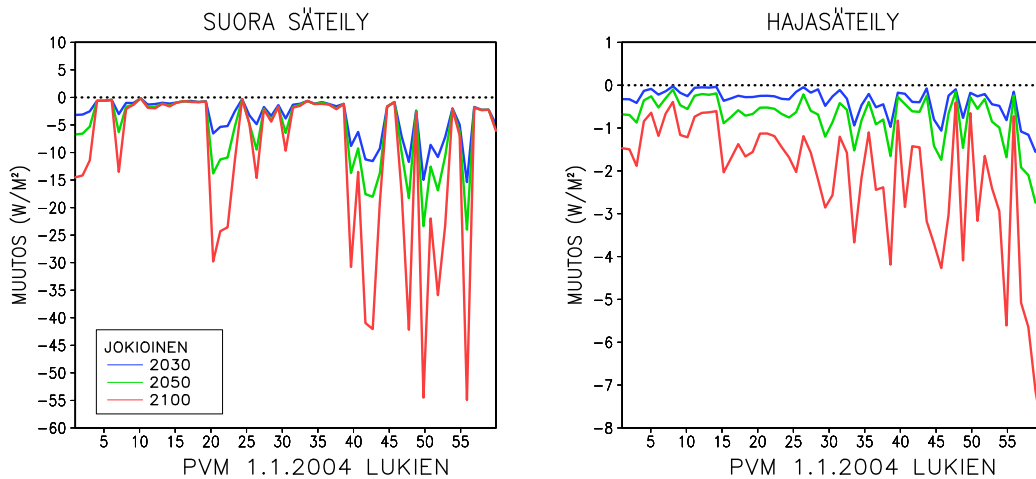
Kuva 12. Tuulen nopeuden (vasen kuva) ja suunnan (oikea kuva) tunnitaiten arvojen muuttuminen Jokioisissa siirryttäessä perusjakson ilmastosta A2-skenaariota vastaavaan vuoden 2030 (sininen käyrä), 2050 (vihreä käyrä) ja 2100 (punainen käyrä) ilmastoon; näytteenä vuoden 2004 tammikuu. Jos havaintojen mukaan kyseisenä ajanhetkenä on ollut tyyntä, ei tuulen suunnan muutosta ole voitu laskea. Käytännössä myös hyvin hiljaiset alle 0.8 m/s tuulet on jätetty oikeanpuoleisesta kuvasta pois.

sateen intensiteetti oli suurimmillaan noin 4 mm/h, eli hiukan enemmän kuin äsken tarkastellussa helmikuun tilanteessa. Hetkellisen sademäärän kasvu ilmaston muuttuessa on muunnosalgoritmin perusteella kuitenkin kesätilanteessa paljon vaatimattomampaa kuin edellisessä talviesimerkissä, enimmilläänkin alle 30 prosenttia. Selityksenä tähän on yhtäältä se, että heinäkuussa keskimääräinen sademäärä lisääntyy huomattavasti vähemmän kuin helmikuussa, vuoteen 2100 tultaessa Jokioisissa noin 14 % (taulukko 3(h)). Neljän millin sade tunnissa ei myöskään ole kesällä mitenkään poikkeuksellisen rankka, ja nimenomaan rankimpia sateitahan muunnosmenetelmä kasvattaa eniten.

Auringon säteilysuureista on selvyuden vuoksi esitetty tunnitaiten arvojen asemesta vuorokausikeskiarvoja (kuva 14). Säteilyn määrä nimittäin riippuu ratkaisevasti auringon korkeuskulmasta ja vaihtelee siksi hyvin voimakkaasti kellonajan mukaan. Talvella mallit ennustavat sätei-



Kuva 13. Yläkuvat: tunnitaitiset sademäärät (millimetreinä) Jokioisissa 4.2.2004 (vasen) ja 29.7.2004 (oikea) havaintojen perusteella (musta käyrä) sekä vastaavat sademäärät siirrettynä vuoden 2100 (A2-skenaario) ilmastoon (punainen käyrä). Alakuvat: tunnitaitisten sademäärien prosentuaaliset muutokset siirryttäessä näiltä perusjakson ajanhetkiltä vuoden 2030 (sinisellä), 2050 (vihreällä) ja 2100 (punaisella) ilmastoon. Suhteellinen muutos on luonnollisesti esitetty vain niille ajanhetkille, joihin havaintoihin perustuva sademäärä poikkeaa nolasta.



Kuva 14. Auringon sädetä vastaan kohtisuoralle pinnalle saatavan suoran säteilyn (vasen kuva) ja vaakasuoralle pinnalle tulevan hajasäteilyn (oikea kuva) vuorokausikeskiarvojen muuttuminen Jyväskylässä siirryttäessä perusjaksosta A2-skenaarion mukaiseen vuoden 2030 (sininen käyrä), 2050 (vihreä käyrä) ja 2100 (punainen käyrä) ilmastoon; näyte v. 2004 tammi-helmikuulta. Huomaa asteikon erilaisuus kuvissa.

lyn määrän vähenevän, ja laskenta-algoritmi nipistää leijonanosan tästä vähennyksestä suorasta eikä hajasäteilystä. Pilvisellä säällä, esimerkiksi tammikuun 16-19. päivinä, suoraa säteilyä ei kuitenkaan saada. Tällöin vähenemä on otettu hajasäteilystä.

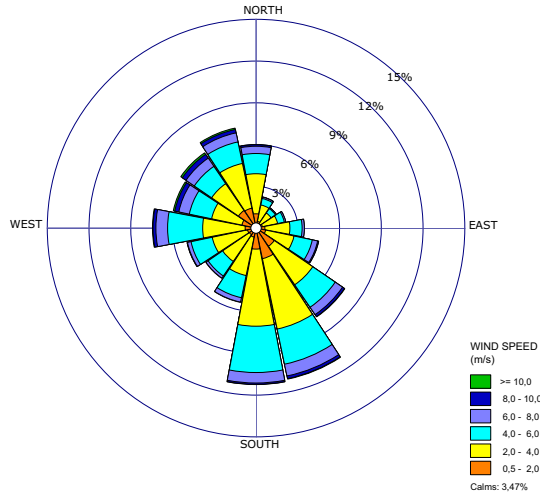
6 Sääaineistoja julkisivujen vaurioitumisen tarkasteluun

Jos lämpötila sateen jälkeen nopeasti putoaa, rakennuksen betoniseinä ei ehdi kuivua ennen sään pakastumista. Koska jäätyminen lisää veden tilavuutta noin 9 %, betoniin imeytynyt jäätyvä vesi voi synnyttää rakenteeseen halkeamia. Riittävän monta kertaa toistuessaan jäätyminen saattaa aikaa myöten vahingoittaa seinää. Jäätymien betonirakenteille aiheuttamien vaurioiden erilaisia mahdollisia syntytapoja on esitelty Lahdensivun ym. (2011a) kirjoituksessa ja siinä annetuissa viitteissä.

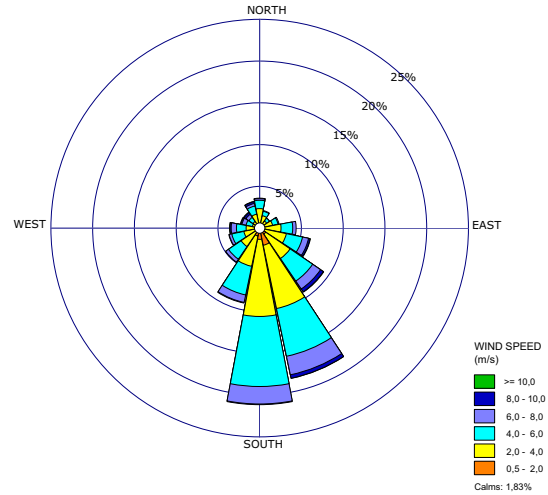
Pakkasten aiheuttaman rapautumisen ja muunlaisten julkisivuvaurioiden synnyn tutkimista varten laskettiin luvuissa 2 ja 3 esitellyistä 30-vuotisista sääaineistoista joukko parametreja:

- Tuulen suunnan ja nopeuden jakaumat, nämä myös erikseen vesi- ja räntäsadetilanteille
- Sään pakastumistilanteitten lukumäärä enintään 2 vrk vesi- tai räntäsateen jälkeen käyttäen erilaisia kynnyslämpötiloja (0°C , -2°C , -5°C , -10°C , -15°C , -20°C)
- Vesi- tai räntäsadepäivien lukumäärä ja tällaisina päivinä saatu sademäärä kunakin talvikautena

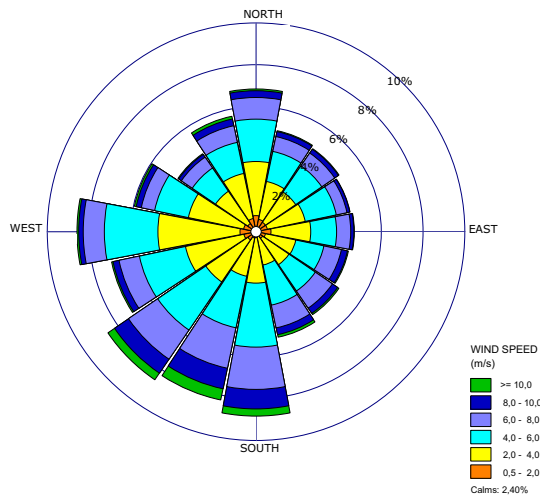
(A) JYVÄSKYLÄ, KAIKKI



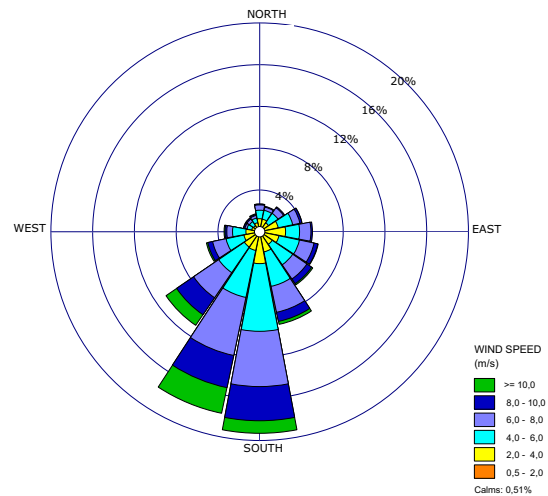
(B) JYVÄSKYLÄ, VESI- JA RÄNTÄSADE



(C) VANTAA, KAIKKI



(D) VANTAA, VESI- JA RÄNTÄSADE



Kuva 15. Vasemmanpuoleiset kuvat (a ja c): tuulen suuntien ja voimakkuuksien jakauma vuosina 1980–2009 viileen vuodenajan kuukausina syyskuusta huhtikuuhun. Oikeanpuoleiset kuvat (b ja d): vastaava tuulten jakauma niissä tilanteissa, joilloin on satanut vettä tai räntää. Ylärivin kuvat perustuvat Jyväskylän, alarivin Vantaan säähavaintoihin. Kussakin kuvassa renkaan alareunassa näkyvät etelätuulet, vasemmalla länsi-, ylhäällä pohjois- ja oikealla itätuulet. Sisäkkäiset renkaat ilmaisevat esiintymisfrekvenssien asteikon. Kunkin ruusun oikeassa alareunassa annetut värit kertovat tuulen voimakkuuden. “Calms” ilmaisee, kuinka monessa prosentissa havaituista tilanteista on ollut tyventä.

6.1 Tuuliruusut

Tuulen suunnan ja nopeuden jakautumia, eli ns. tuuliruusuja, on esitetty kuvassa 15. Syys-huhtikuun välisenä aikana Jyväskylässä tuulee yleisimmin etelän ja kaakon suunnalta, Vantaalla taas lounaasta (kuvat 15(a) ja (c)). Mutta kun poimitaan tuulet vain niiltä ajankohdilta, jolloin on satanut vettä tai räntää, kuva muuttuu melkoisesti: ylivoimaisessa enemmistössä näistä tilanteista tuuli on puhaltanut etelän suunnalta (kuvat 15(b) ja (d)). Ilmiö on helposti selitettävissä. Yhtäältä sadealueet varsin usein edeltävät nimenomaan lännestä saapuvia matalapaineita, ja tällöin ilmanpaineen jakauma määrää tuulet käymään etelän puolelta. Toisaalta varsinkin talvikuukausina idän ja pohjoisen suuntaiset tuulet tuovat mukanaan niin kylmää ilmaa, että sateen sattuessa saadaankin lunta eikä vettä tai räntää. Lännen- ja luoteenpuoleiset tuulet taas ovat useimmiten kuivia eikä niihin liity merkittäviä sademääriä missään olomuodossa.

Toinen huomionarvoinen piirre kuvassa 15 on, että vain vesi- ja räntäsadetilanteet mukaan ottaen koostetuissa tuuliruusuissa (b) ja (d) esiintyy enemmän kovia ja vähemmän heikkoja tuulen nopeuksia kuin tarkasteltaessa kaikkia ajanhetkiä (kuvat 15(a) ja (c)). Sateen aikana siis tyypillisesti tuulee kovemmin kuin poudalla. Tätäkin voidaan selittää sateitten liittymisellä matalapaineisiin, joitten ympärillä esiintyy isoista paine-eroista johtuen usein kovia tuulia.

6.2 Vesi- tai räntäsadetta seuraavat sään pakastumiset

Toisessa tehtäväkokonaisuudessa oli tarkoituksena selvittää niiden tapausten esiintymistä, jolloin vesi- tai räntäsadetta on seurannut pakkasen kahden vuorokauden kuluessa sateen päättyemisestä, tarkastellen sekä mennyttä että tulevaa ilmastoa. Veden jäätyminen betonirakenteen pienimmissä huokosissa vaatii jopa 15–20 asteen pakkasen (Lahdensivu ym., 2011a), ja sen takia pakastumistilanteitten lukumäärät laskettiin usealla eri kynnyslämpötilalla.

Laskenta toteutettiin kolmessa vaiheessa:

1. Sääaineistoista (havaittua tai tulevaa ilmastoa kuvaavista) etsittiin sellaiset jaksot, joitten aikana oli satanut joko vettä tai räntää. Aluksi käytiin läpi sateiset tunnit ja pääteltiin sateen olomuoto lämpötilan ja suhteellisen kosteuden perusteella käyttäen Saltikofin (2011, kuva 3.1) esittämää laskentamenetelmää. Sen jälkeen tallennettiin muistiin kunkin sadejakson alkamis- ja loppumisaika sekä kertynyt sadesumma; sadetta piti kertyä vähintään yksi millimetri, jotta sadejakso otettiin mukaan laskelmiin. Sadejakso tulkittiin päättyneeksi joko sateen loppuessa tai olomuodon muuttuessa lumeksi.
2. Seuraavassa vaiheessa haettiin kunkin sadejakson päättymistä seuraavan 48 tunnin aikana esiintynyt alhaisin lämpötila. Tässä on kuitenkin oltava tarkkana, mikäli uusi sadejakso oli alkanut pikemmin kuin 48 tunnin kuluessa edellisen päättymisestä; tällöin rajattiin edellistä jaksoa seuraavan minimilämpötilan etsintäaika edellisen jakson päättymishetkestä uuden jakson alkamishetkeen. Menettelyä voidaan perustella havaintoesimerkin avulla. Esimerkkitapauksessa ensimmäinen sadejakso päättyi 23.2.1990 klo 9 ja seuraava alkoi 23.2.1990 klo 15, ja jaksojen välillä lämpötila oli koko ajan nollan yläpuolella. Jälkimmäinen sadejakso päättyi 24.2.1990 klo 21 ja pian tämän jälkeen lämpötila laski pakkasen puolelle. Mikäli 2 vrk:n säännöstä pidettäisiin kaavamaisesti kiinni, saataisiinkin aikavälille 23.2.1990 klo 9 – 24.2.1990 klo 21 kaksi sadetta seuraavaa pakastumistilannetta, mikä selvästikin olisi harhaanjohtavaa. Sen tähden tällaiset tapaukset laskettiin vain yhdeksi

pakastumistilanteeksi. Siis mikäli sadejaksojen väli on kestänyt alle 2 vrk, on ensimmäistä jaksoa seuraavaksi alimmaksi lämpötilaksi valittu jaksojen välisen sadetauon alin lämpötila.

3. Lopuksi laskettiin kullekin kuukaudelle niiden jaksojen keskimääräinen lukumäärä 30 vuoden aikana, jolloin minimilämpötila oli sateen jälkeen laskenut asetetun kynnsarvon alapuolelle.

Pakastumistilanteitten etsintä perustui REFI-B-hanketta varten luotuihin 30 vuoden mittaisiin sääaineistoihin (luvut 2-3).

Vesi- tai räntäsateen päättymistä kahden vuorokauden sisällä seuranneitten pakastumistilanteitten keskimääräiset vuotuiset lukumäärät on esitetty taulukossa 2. Etelä-Suomessa (Vantaa, Jokioinen ja Jyväskylä) ilmaston lämpeneminen vähentää tällaisten pakastumistilanteitten esiintymistä, ja tämä pätee riippumatta siitä, millaista pakkasen kynnsarvoa on käytetty. Kun siirrytään tarpeeksi kauas tulevaisuuteen (v. 2100) ja tarkastellaan kaikkein kovimpia pakkasrajoja, näin käy myös pohjoisessa.

Kylmänä vuodenaikana varsinkin etelässä esiintyy varsin usein tilanteita, jolloin sade alkaa lu-

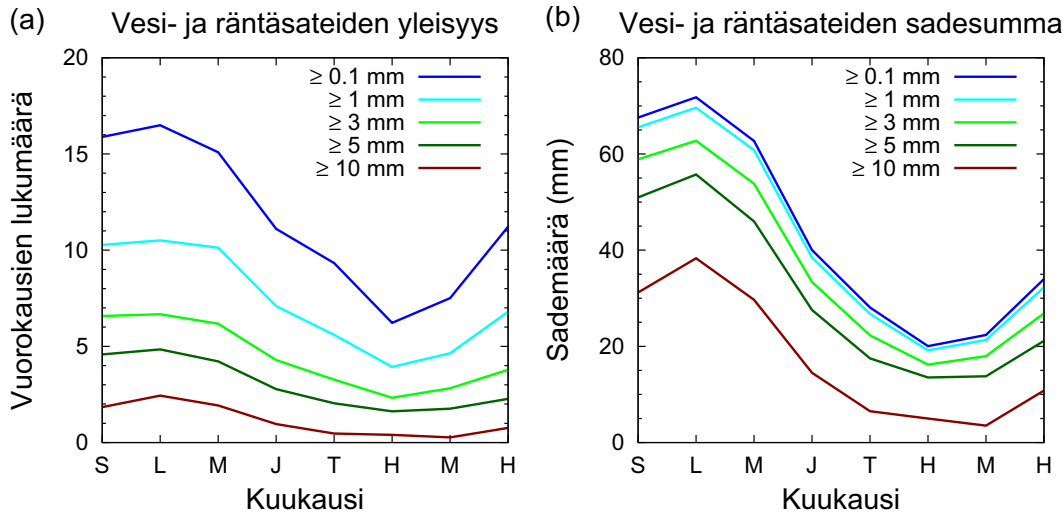
Taulukko 2. Vesi- tai räntäsadetta seuranneitten pakastumistilanteitten keskimääräinen vuotuinen lukumäärä neljällä paikkakunnalla v. 1980–2009 säähavaintotietojen mukaan sekä A2-skenaarion mukaiset arviot vuosien 2030, 2050 ja 2100 ilmastossa. Tulos on esitetty erikseen eri kynnsälämpötiloille, eli kun lämpötila on 48 tunnin kuluessa sadejakson päättymisestä laskenut 0°C, -2°C, -5°C, -10°C, -15°C tai -20°C rajan alapuolelle.

Paikkakunta	Ajankohta	0°C	-2°C	-5°C	-10°C	-15°C	-20°C
Vantaa	1980–2009	37.8	23.5	11.7	4.0	1.3	0.2
Vantaa	2030 (A2)	25.6	15.2	7.7	2.3	0.7	0.0
Vantaa	2050 (A2)	21.4	12.9	6.1	1.8	0.3	0.0
Vantaa	2100 (A2)	14.5	9.4	3.9	0.4	0.0	0.0
Jokioinen	1980–2009	34.6	22.3	11.1	4.2	1.3	0.4
Jokioinen	2030 (A2)	26.5	16.0	8.2	3.0	1.0	0.1
Jokioinen	2050 (A2)	23.8	14.8	7.6	2.5	0.6	0.0
Jokioinen	2100 (A2)	17.2	11.3	5.8	1.1	0.0	0.0
Jyväskylä	1980–2009	30.4	20.2	10.4	4.2	1.6	0.5
Jyväskylä	2030 (A2)	25.4	17.5	9.6	3.3	1.3	0.4
Jyväskylä	2050 (A2)	24.8	17.0	9.4	3.2	0.9	0.2
Jyväskylä	2100 (A2)	19.8	13.9	7.3	2.1	0.2	0.0
Sodankylä	1980–2009	23.4	18.1	10.4	5.0	2.7	0.8
Sodankylä	2030 (A2)	20.6	15.5	9.9	4.7	2.5	0.9
Sodankylä	2050 (A2)	22.3	16.7	11.4	5.8	2.5	0.9
Sodankylä	2100 (A2)	25.2	20.0	13.3	5.7	1.8	0.0

mena, mutta matalapainetta edeltävät lämpimät ilmavirtaukset muuttavat olomuodon myöhemmin rännäksi tai vedeksi. Tällöinkin sade usein lähtee pilvestä lumena mutta sulaa ennen maahan saapumistaan kokonaan tai osittain. Sulaminen sitoo runsaasti lämpöenergiaa, mikä estää lämpötilaa kohoamasta kovin paljoa nollan asteen yläpuolelle. Osittain tästä ilmiöstä johtuen lähellä nollaa olevia lämpötiloja esiintyy varsin paljon, mikä näkyy lämpötilojen frekvenssijakaumistakin (kuvan 4 mustat pylvää). Todellisuudessa nollan asteen kohdalla ilmeisesti pitäisi olla vastaavankaltainen huippu myös tulevaisuuden ilmaston lämpötilan frekvenssijakaumissa. Tässä tutkimuksessa käytetty lämpötilojen muunnosmenetelmä (kaava (1)) ei kuitenkaan saa sitä esille, vaan suuret frekvenssit siirtyvät selvästi lämpöasteitten puolelle, vuoden 2100 ilmastossa +5°C:n vaiheille (kuvan 4 punaiset pylvää).

Pakkanen seuraa vesi- tai räntäsadetta kaikkein herkimmin juuri silloin, kun lämpötila on sateen aikana ollut vain niukin naukin nollan yläpuolella. Koska tässä tutkimuksessa muodostetuissa tulevaisuuden ilmastoa kuvaavissa sääaineistoissa tuollaisia koleita vesi- ja räntäsadetilanteita mitä ilmeisimmin esiintyy lämpötilan frekvenssijakauman ongelmien takia vähemmän kuin kuuluisi, myös pakastumisia sateen jälkeen luultavasti sattuu liian vähän. Sen tähden taulukossa 2 esitetyt lukemat vuosien 2030, 2050 ja 2100 ilmastolle lienevät liian pieniä. Tämä on selvimminkin nähtävissä Sodankylän tiedoista: niitten mukaan sateenjälkeiset pakastumiset näyttäisivät ensin vähentyvän siirryttäessä vuoden 2030 ilmastoon, mutta sen jälkeen ne taas yleistyvät; tämä pätee lukuun ottamatta kaikkein ankarimpia pakkasrajoja.

Taulukon 2 tulokset lienevät kyllä kvalitatiivisesti oikeansuuntaisia sikäli, että etelässä sateita seuraavat pakastumiset olisivat harvinaistumassa ja pohjoisessa yleistymässä. Kuitenkin tulevaisuutta kuvaavat lukuarvot lienevät kauttaaltaan suuruudeltaan liian alhaisia.



Kuva 16. Vesi- ja räntäsadepäivien keskimääräinen lukumäärä (vasen) ja tällaisina päivinä kertynyt sademäärä (oikea) kuukausittain Vantaalla syys-huhtikuussa vuosien 1961–2006 säähavaintojen perusteella. Tulokset on laskettu vuorokauden sademäärän eri kynnyksiarvoille.

6.3 Vesi- ja räntäsadepäivien lukumäärä ja näiden päivien sadesumma

Viimeisenä aiheena tarkasteltiin syys-huhtikuun aikana esiintyneitä vesi- ja räntäsateita. Mukana olivat ne tapaukset, joissa havainnontekijä oli kirjannut sateen olomuodon olleen vettä tai räntää jossain vaiheessa ns. sadevuorokauden aikana (joka vaihtuu uuteen aamulla klo 8 Suomen normaaliaikaa). Tapaukset poimittiin Vantaan, Turun ja Jyväskylän havainnoista vuosilta 1961–2006. Vuoden 2006 jälkeen havainnontekoa on siirretty automaattisille laitteille, joten ais-tinvaraista havaintotietoa sateen olomuodosta ei enää ollut käytettävissä.

Havaintotiedoista laskettiin aluksi kuukausittain niiden päivien lukumäärä, joina oli ainakin jos-sakin vaiheessa satanut vettä tai räntää ja vuorokauden sademäärä ylitti asetetun kynnsarvon (0,1, 1, 3, 5 tai 10 mm). Lisäksi laskettiin kyseisten vesi- ja räntäsadepäivien sademäärien sum-mat. Kuvan 16 mukaan esimerkiksi Vantaalla vesi- ja räntäsadepäiviä on esiintynyt huhtikuus-sa suunnilleen saman verran kuin joulukuussa, vähiten taas helmi-maaliskuussa. Näinä kahtena kuukautena myös kyseisten päivien yhteenlasketut sademäärät ovat pienimmät. Syksyn kuu-kausina taas molemmat lukuarvot ovat suuria, koska sateita saadaan paljon ja eteläisimmässä Suomessa ne tulevat valtaosin vetenä.

7 Yhteenveto

Tässä raportissa esitellään REFI-B-hankkeessa laadittuja rakennusfysikaalisiin tutkimuksiin räätälöityjä sääaineistoja. Havaittua ja arvioitua tulevaisuuden ilmastoa kuvaavia sääsuureitten ai-kasarjoja on käytetty mm. rakennusten ulkoseinien sekä ylä- ja alapohjien kosteyslaskelmiin, ra-kennusten energiakulutuksen muutosten arviointiin ja rakennusten julkisivujen vaurioitumisen tarkasteluun (Vinha ym., 2012).

Havaintoihin perustuvia, ajallisesti tunnin välein interpoloituja, vuodet 1980–2009 kattavia sää-aineistoja muodostettiin neljälle paikkakunnalle (Vantaa, Jokioinen, Jyväskylä ja Sodankylä). Nämä säätiedot muunnettiin ilmastomallien tuloksia hyväksi käyttäen vastaamaan vuosien 2030, 2050 ja 2100 arvioitua ilmastoa. Tulevaisuuden ilmastoaineistoja luotaessa on otettu huomioon yhtäältä lämpötilan, ilman kosteuden, tuulen nopeuden sekä sen länsi- ja eteläkomponentin, maan pinnalle saatavan auringon säteilyn sekä sademäärän malleilla simuloitu muutos. Sen lisäksi on käytetty mallien antamia arviota lämpötilan vaihtelun keskihajonnan sekä sateitten esiintymistä ja voimakkuutta kuvaavien indeksien muuttumisesta.

Keinotekoisten sääaineistojen muodostamisessa käytetty delta-menetelmä säilyttää sään vaih-telun päivästä toiseen ja eri sääsuureitten vaihtelujen keskinäiset riippuvuudet kvalitatiivisesti havaintojen mukaisina. Toisaalta havaittua ja tulevaa ilmastoa kuvaavista säätietiedoista lasket-tujen tilastollisten suureitten ero vastaa mallien simuloimaa ilmaston muutosta joko tarkkaan (esim. keskilämpötilan ja kokonaissademäärän muutos) tai ainakin likimääräisesti (esim. tuulen komponenttien ja sadepäivien lukumäärän muutos).

Sääaikaasarjojen muunnosmenetelmät tuottivat yleensä järkeviä tuloksia (kappaleet 3.2–3.4; luku 5). Havaittujen lämpötilojen frekvenssijakaumassa nollan asteen lähellä esiintyvä huippu siirtyi muunnoksessa lämpöasteitten puolelle, mitä ilmeisestikään ei tapahdu todellisuudessa. Suhteel-lisia kosteuksia tarkasteltaessa on pidettävä mielessä, että ne on ilmoitettu nestemäisen veden suhteen myös lämpötilan ollessa nollan alapuolella. Ilmaston lämmitessä tämä johtaa automaat-tisesti kosteuden kohoamiseen pakkastilanteissa. Sen tähden talvipuolella vuotta kosteudet ovat kohonneet enemmän kuin puhtaasti mallitulosten perusteella näyttäisi.

Tulevaisuutta kuvaavissa aikasarjoissa säämuuttujien arvot on annettu näennäisesti 1–2 desimaalin tarkkuudella, vaikka todellisuudessa niihin sisältyy paljon epävarmuutta. Esitystarkkuus on valittu tällaiseksi, koska näin saadaan esiin havaintojen mukaisen ja tulevaisuuden ilmaston väliset erot niissäkin tapauksissa, kun erot eivät ole suuria, esimerkiksi tarkasteltaessa tuulen voimakkuuksia keväällä ja kesällä.

Havaittua ja tulevaa ilmastoa kuvaavista 30-vuotisista aikasarjoista poimittiin vielä erikseen kaksi sääoloiltaan erikoista tapausta: vuosi 2004 Jokioisten ja vuosi 2007 Vantaan säätiedoista. Näitä kutsutaan rakennusfysikaalisiksi testivuosiksi. Testivuosien sääaineistoja luotaessa tunnittaiset sademäärät ja auringon säteilyä kuvaavat muuttujat voitiin laskea tarkemmin kuin pitkissä 30-vuotisissa aineistoissa (luku 4). Myös testivuosien sääaineistot muunnettiin kuvaamaan tulevaa ilmastoa (luku 5).

Tulevaisuutta kuvaavat sääaineistot ovat pakostakin epävarmoja. Niitä muodostettaessa käytetyt ilmastonmuutoskkenaariot perustuvat tällä hetkellä käytössä olevien ilmastomallien keskimääräisiin tuloksiin. Todellisuudessa eri mallien tulokset poikkeavat toisistaan vielä melko paljon (Ruosteenoja, 2011, kuvat 3.13–3.14), ja mallien tarkentuessa käsityksemme tulevasta ilmastosta voi vielä muuttua. Tätä varten tarkasteltiin uudempia, IPCC:n viidennen arviointiraportin pohjana käytettäviä malleja. Alustavien tulosten perusteella näyttäisi siltä, että kasvihuonekaasujen pitoisuuksien lisääntyessä nämä mallit lämmittäisivät Suomea kesällä jonkin verran enemmän kuin edellinen mallisukupolvi. Sademäärissä ja talviaikaisessa lämpenemisessä ei olisi suurta eroa.

Ilmastomallien erojen ohella toinen tärkeä epävarmuuden lähde liittyy kasvihuonekaasujen tuleviin päästöihin. Tämän raportin tuloksia laskettaessa on oletettu päästöjen kasvavan koko tämän vuosisadan ajan (A2-skenaario). Mikäli päästötä saadaan rajoitettua, ilmastonmuutos vastaavasti toteutuisi miedompana (kuva 1). Jos esimerkiksi kasvihuonekaasujen tulevat pitoisuudet seuraisivatkin B1-skenaariota, A2-skenaarion mukaan vuoden 2050 tienoille ennustettuun ilmaston muutokseen yllettäisiin vasta vuoden 2080 vaiheilla.

Säässä ja ilmastossa esiintyy myös luonnollisia vaihteluita — vuodet eivät ole veljeksiä. Johonkin tulevaan ajanjaksoon voi sattuman saattamana kasaantua useita sääoloiltaan poikkeuksellisia vuosia, mikä näkyisi pitkäaikaisissa keskiarvoissakin. Tällaisia luonnollisia vaihteluita ei ole mahdollista ennustaa kauaksi tulevaisuuteen millään keinolla.

Tulevaisuuden ilmastoon muunnettuja säätietojen aikasarjoja ei pidä millään muotoa ajatella ennusteina joillekin yksittäisille hetkille. Sen sijaan niitä tulee tarkastella kokonaisuuksina, jotka havainnollistavat tulevaisuudessa — nykyisen käsityksen mukaan — vallitsevaa ilmastoa.

Käyttäessään tulevaisuutta koskevia ilmastoaineistoja ja tulkitessaan saamiaan tuloksia käyttäjän tulee visusti pitää mielessään mainitut rajoitukset.

Kiitokset

Hankkeen rahoituksesta vastasi ympäristöministeriö, jonka puolesta hankkeen valvojana toimi yli-insinööri Katja Outinen. Hanke tuotti ilmastoa kuvaavia havaintotietoja ja malliarvioita Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksen vetämälle FRAME-hankkeelle (Future envelope assemblies and HVAC solutions); heidän puoleltaan yhteistyökumppaneina toimivat erityisesti tutkimusjohtaja Juha Vinha (hankkeen vetäjä) ja tutkimuspäällikkö Jukka Lahdensivu.

Havaintoaineistojen interpoloinnista tunnin välein Ilmatieteen laitoksen ohjeistuksen mukaisesti vastasi DI Jarkko Piironen Tampereen teknillisestä yliopistosta.

Tutkimuksessa käytetyt havaintoaineistot on saatu Ilmatieteen laitoksen ilmastotietokannasta, ja maailmanlaajuisten ilmastomallien tuottamat aineistot ovat peräisin kansainvälisestä “World Climate Research Programme (WCRP) Coupled Model Intercomparison Project phase 3 (CMIP3) multi-model dataset” -tietopankista.

Ilmatieteen laitoksen eri yksiköitten työntekijät ovat auttaneet hankkeen etenemisessä. Meteorologi Seppo Saku täydensi havaintoajaksarjoja, erikoistutkija Pauli Rissanen opasti säähavaintokoodien tulkinnessa ja tutkija Marjo Hippi toimitti säätutkaverkoston perustuvia tunnitaisia sadetietoja. Tutkimusavustaja Jaakko Forsius ja meteorologi Henriikka Simola ovat vastanneet hankkeen verkkosivuston ylläpidosta.

Kirjallisuusviitteet

- Aaltonen, J., H. Hohti, K. Jylhä, T. Karvonen, T. Kilpeläinen, J. Koistinen, J. Kotro, T. Kuitunen, M. Ollila, A. Parvio, S. Pulkkinen, J. Silander, T. Tiihonen, H. Tuomenvirta ja A. Vajda, 2008: Rankkasateet ja taajamatulvat (RATU). *Suomen ympäristö* **31-2008**.
- Gregow, H., K. Ruosteenoja, N. Pimenoff and K. Jylhä, 2012: Changes in the mean and extreme geostrophic wind speeds in Northern Europe until 2100 based on nine global climate models. *Int. J. Climatology*, **32**, 1834–1846. DOI: 10.1002/joc.2398.
- Ilmatieteen laitos, 1986: Sääsähkeohjeet — Synop. ISBN: 951-697-232-2. Valtion painatuskeskus, 91 s.
- IPCC, 2001: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K. and Johnson C.A. (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge and New York, 881 p.
- Jylhä, K., K. Ruosteenoja, J. Räisänen, A. Venäläinen, H. Tuomenvirta, L. Ruokolainen, S. Saku ja T. Seitola, 2009: Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten. ACCLIM-hankkeen raportti 2009. *Raportteja* 2009:4, Ilmatieteen laitos, 102 s.
- Jylhä, K., T. Kalamees, H. Tietäväinen, K. Ruosteenoja, J. Jokisalo, R. Hyvönen, S. Ilomets, S. Saku, A. Huttila, 2011: Rakennusten energialaskennan testivuosi 2012 ja arviot ilmastomuutoksen vaikutuksista. (Test reference year 2012 for building energy demand and impacts of climate change). *Raportteja* 2011:6, Ilmatieteen laitos. 110 s.
- Kalamees T., K. Jylhä, H. Tietäväinen, J. Jokisalo., S. Ilomets, R. Hyvönen and S. Saku, 2012: Development of weighting factors for climate variables for selecting the energy reference year according to the EN ISO 15927-4 standard. *Energy and Buildings* , **47**, 53–60. doi:10.1016/j.enbuild.2011.11.031.
- Kangas M., M. Hippi, J. Ruotsalainen, S. Näsman, R. Ruuhela, A. Venäläinen and M. Heikinheimo, 2006: The FMI Road Weather Model. HIRLAM All Staff Meeting, Sofia, Bulgaria, 15–18 May 2006. HIRLAM Newsletter no. 51, October 2006. Available from: http://hirlam.org/index.php?option=com_docman&task=doc_details&gid=476&Itemid=70.

- Koistinen J. ja D.B. Michelson, 2002: BALTEX weather radar-based precipitation products and their accuracies. *Boreal Environ. Res.*, **7**, 253–263.
- Lahdensivu, J. 2012: Durability properties and actual deterioration of Finnish concrete facades and balconies. *Publication 1028*. Tampere University of Technology. 117 p + app. 37 p.
- Lahdensivu, J., H. Tietäväinen and P. Pirinen, 2011a: Durability properties and deterioration of concrete facades made of insufficient frost resistant concrete. *Nordic Concrete Research*, **44**, 175–188.
- Lahdensivu, J., H. Tietäväinen and P. Pirinen, 2011b: Influence of climate change to concrete buildings — preliminary study. 9th Nordic Symposium on Building Physics in Tampere, Finland. 901–908.
- Lehtonen, I, 2011: *Äärisademäärien muutokset Euroopassa maailmanlaajuisten ilmastomallien perusteella*. Gradutyö, Helsingin yliopiston Fysikaalisten tieteitten laitos. 70 s.
- Lehtonen, I., K. Ruosteenoja and K. Jylhä, 2013: Projected changes in European extreme precipitation indices on the basis of global and regional climate model ensembles. Submitted to *Int. J. Climatology*.
- Raper, S.C.B, J.M. Gregory and T.J. Osborn, 2001: Use of an upwelling-diffusion energy balance climate model to simulate and diagnose A/OGCM results. *Clim. Dyn.*, **17**, 601–613.
- Ruosteenoja, K., 2011: Miten ja miksi ilmasto muuttuu? Teoksessa: Virtanen A. ja L. Rohweder (toim.): *Ilmastonmuutos käytännössä — hillinnän ja sopeutumisen keinoja*. Gaudeamus. 69–108.
- Ruosteenoja, K. and P. Räisänen, 2013: Seasonal changes in solar radiation and relative humidity in Europe in response to global warming. *J. Climate*, in press. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00007.
- Saltikoff, E., 2011: On the use of weather radar for mesoscale applications in northern conditions. *Finnish Meteorological Institute Contributions* 88. 38 p. Verkko-osoite: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-697-742-6>.
- Vinha, J., A. Laukkarinen, M. Mäkitalo, S. Nurmi, P. Huttunen, T. Pakkanen, P. Kero, E. Manelius, J. Lahdensivu, A. Köliö, K. Lähdesmäki, J. Piironen, V. Kuhno, M. Pirinen, A. Aaltonen J. Suonketo, J. Jokisalo, O. Teriö ja A. Koskenvesa, 2012: Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. *Tutkimusraportti* 159. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos.

Liite 1: Sademäärän muuntaminen tulevaisuuden ilmastoon

Muodostettaessa tulevaisuuden ilmaston keinotekoisia tunnittaisia sademäärän aikasarjoja tarvittiin tietoa kolmen ilmastosuureen muutoksesta: keskimääräinen kuukausisademäärä, sadepäivien (sademäärä ≥ 1 mm/vrk) osuus kaikista päivistä, ja keskimääräinen sademäärä niinä päivinä, jolloin on satanut vähintään 1 mm.

L1.1 Mallitiedoista lasketut sademäärien muutosindeksit

Mallitulosten perusteella laskettiin kolme sademäärän muutosta kuvaavaa indeksiä:

(a) Keskimääräisen kuukausisademäärän muutos

Poimittiin aluksi 19 mallin tulosten keskiarvona saadut sademäärän muutokset \bar{P}_j vuosille $j = 1995, 2030, 2050$ ja 2085 . Kukin näistä kuvaa ko. vuotta ympäröivän 30-vuotijakson sademäärän muutosta prosentteina suhteessa jaksoon 1971–2000. Halutut sademäärän muutokset $\Delta\bar{P}_j$ suhteessa jakson 1980–2009 keskiarvoon saatiin kahdelle ensimmäiselle tulevaisuuden jaksolle ($j = 2030$ ja $j = 2050$; j on siis jakson keskimääräinen vuosi) suoraan näistä tiedoista²:

$$\Delta\bar{P}_j = \bar{P}_j - \bar{P}_{1995} \quad (6)$$

Sademäärän muutos viimeiselle jaksolle saadaan:

$$\Delta\bar{P}_{2100} = \frac{T_{2100}^g - T_{1995}^g}{T_{2085}^g - T_{1995}^g} \Delta\bar{P}_{2085} \quad (7)$$

missä T^g on yksinkertaisella MAGICC-ilmastomallilla arvioitu maapallon keskilämpötila, jollaista käytettiin myös kaavassa (2). Ilmastomuutospakote $\Delta\bar{P}$ määrettiin erikseen jokaiselle kasvihuonekaasuskenaariolle (A1B, A2 tai B1).

(b) Sadepäivien prosentuaalisen osuuden muutos

Laskelman pohjana käytettiin Lehtosen (2011) laskemia mallien simuloimien vuorokausisademäärien frekvenssijakaumia jaksoille 1971–2000 ($j = 1986$), 2046–2065 ($j = 2056$) ja 2081–2100 ($j = 2091$). Sadepäiviksi määriteltiin ne päivät, joina oli tullut vettä jossakin olomuodossa vähintään 1 mm/vrk. Sadepäivien prosenttiosuudet laskettiin erikseen kaikille kolmelle ajanjaksolle 10 mallin tulosten keskiarvona. Näistä saatiin ajan suhteen interpoloimalla (kuva 2) arvio

²Koska keskimääräisen sademäärän muutokset on ilmaistu prosentteina, tarkkaan ottaen kaavan (6) pitäisi olla muodossa:

$$\Delta\bar{P}_j = \frac{\bar{R}_{1986}}{\bar{R}_{1995}} (\bar{P}_j - \bar{P}_{1995}) = \frac{\bar{P}_j - \bar{P}_{1995}}{(1 + \bar{P}_{1995}/100)}$$

missä \bar{R} on kyseisen 30-vuotijakson keskimääräinen kuukausisademäärä. Sama korjaustekijä $1 + \bar{P}_{1995}/100$ tulee jakajaksi myös kaavaan (7). Koska \bar{P}_{1995} on ilmastomallitulosten keskiarvoa tarkasteltaessa enimmillään 3 % luokkaa, käytännössä korjaustekijän arvo on hyvin lähellä ykköstä ja siitä aiheutuva heitto sademäärän muutoksen arvioihin on pieni.

malleilla simuloitujen sadepäivien prosenttiosuuksiksi havaintojaksolla ($j = 1995$) ja kahdella ensimmäisellä skenaariojaksolla ($j = 2030, 2050$):

$$SP_j = SP_{1986} + \frac{j - 1986}{2056 - 1986} (SP_{2056} - SP_{1986}) \quad (8)$$

Vuoden 2100 ilmasto varten sadepäivien lukumäärää ekstrapoloitiin lineaarisesti viimeisestä simulointijaksosta eteenpäin:

$$SP_{2100} = SP_{2091} + \frac{2100 - 2091}{2091 - 2056} (SP_{2091} - SP_{2056}) \quad (9)$$

Ekstrapolointia tarvittiin siis vain yhdeksän vuoden pituiselle ajanjaksolle viimeisen skenaariojaksos keskipöhdasta eteenpäin.

Näitten tietojen perusteella laskettiin, erikseen kullekin kuukaudelle ja tulevaisuuden jaksolle, sadepäivien määrien suhdeluvut SP_j/SP_{1995} , $j = 2030, 2050, 2100$. Kaikki arvot perustuvat A1B-skenaarioon ja 10 mallin keskiarvoon. Esimerkiksi A2-skenaariön mukaisia päivittäisiä sademääriä oli käytössä vain seitsemästä mallista (Lehtonen, 2011, taulukko 4.1), eikä arviota haluttu perustaa näin pieneen määrään malleja.

(c) Sateen intensiteetti-indeksin muutos

Sateen intensiteetti-indeksi (engl. "Simple daily intensity index") on keskimääräinen sademäärä niinä päivinä, jolloin vuorokauden sademäärä $P(v)$ on vähintään 1 mm:

$$SI = \frac{\sum_{P(v) \geq 1\text{mm/vrk}} P(v)}{\sum_{P(v) \geq 1\text{mm/vrk}} 1} \quad (10)$$

Intensiteetti-indeksi SI laskettiin 10 mallin tulosten keskiarvona erikseen jaksoille 1971–2000 ($j = 1986$), 2046–2065 ($j = 2056$; tältä jaksolta vain yhdeksän mallin tiedot) ja 2081–2100 ($j = 2096$) ja näistä edelleen ajan suhteen inter- ja ekstrapoloimalla arvot jaksoille $j = 1995, 2030, 2050$ ja 2100; menettely oli vastaavanlainen kuin sadepäivien lukumäärälle kaavoissa (8) ja (9). Jatkotyöskentelyä varten tallennettiin intensiteetti-indeksin suhdeluvut SI_j/SI_{1995} kullekin kuukaudelle ja tulevaisuuden jaksoille $j = 2030, 2050, 2100$. Nytkin muutos perustui A1B-skenaarioon.

L1.2 Muuttuneen ilmaston tunnittaisten sademäärien laskeminen

Sadeilmasto pyrittiin muuntamaan tulevaa ilmasto vastavaksi niin, että sadepäivien lukumäärä, sateen intensiteetti-indeksi ja keskimääräinen kokonaissademäärä muuttuisivat mallien ennustamalla tavalla. Viimeisen ehdon vaadittiin täyttyvän tarkkaan, minkä seurauksena kaksi ensimmäistä ehtoa saatiin toteutumaan vain likimäärin.

Muunnos tehtiin neljässä vaiheessa. Vaiheissa 1–2 käsiteltiin vuorokautisia sadesummia ja vaiheissa 3–4 tunnittaista sademääriä.

Vaihe 1: Sadepäivien lukumäärän muuntaminen vastaamaan tulevaa ilmasto.

Lisättiin tai vähennettiin lähellä yhtä millimetriä olevia vuorokausisademääriä niin, että yli 1 mm/vrk sadepäivien prosenttiosuus muuttui mallien ennustamalla tavalla. Nollasademääriin ei

kajottu, ja myös huomattavasti yhtä milliiä suuremmat sademäärät pidettiin käytännössä ennallaan.

Ensin laskettiin havainnoista yli 1 mm/vrk sadepäivien lukumäärä ja suhteellinen osuus kaikista päivistä kunakin 12 kalenterikuukautena jakson 1980–2009 havaintotietojen pohjalta. Tämä osuus kerrottiin mallien ennustamalla muutoksella SP_j/SP_{1995} ($j = 2030, 2050, 2100$). Sen jälkeen etsittiin havaintoaineistosta sellainen vrk-sademäärän kynnyсарvo P_{raja} , jonka ylittäviä päiviä oli havaintoaineistossa yhtä paljon kuin tulevassa ilmastossa ennustettiin olevan yli 1 mm/vrk sadepäiviä. Sitten lisättiin/vähennettiin päivittäisiä sademääriä sopivasti, jotta tulevaa ilmastoa kuvaaviin 30 vuoden aikasarjoihin tulisi oikea (mallien ennustaman muutoksen kanssa sopusoinnussa oleva) määrä sadepäiviä.

Päivittäisen sademäärän muutokselle tässä vaiheessa asetettu arvo oli enimmillään $DR = 1.0 - P_{raja}$. Jos sadepäivien määrä lisääntyy, niin $DR > 0$, ja päivittäisen sademäärän lisäys noudatti seuraavankaltaista riippuvuutta perusjakson päivittäisestä sademäärästä $P_{hav}(v)$

$$\Delta P^{(1)} = P_{hav}(v) \cdot DR / P_{raja}, \quad P_{hav}(v) < P_{raja} \quad (11)$$

$$\Delta P^{(1)} = DR, \quad P_{raja} \leq P_{hav}(v) < 1 \quad (12)$$

$$\Delta P^{(1)} = DR \cdot \exp\{-(P_{hav}(v) - 1)\}, \quad P_{hav}(v) \geq 1 \quad (13)$$

missä v on aikakoordinaatti vuorokausina. Jos taas sadepäivien määrä vähenee, eli $DR < 0$, sademääriä vähennettiin seuraavasti:

$$\Delta P^{(1)} = P_{hav}(v) \cdot DR / P_{raja}, \quad P_{hav}(v) < P_{raja} \quad (14)$$

$$\Delta P^{(1)} = DR \cdot \exp\{-(P_{hav}(v) - P_{raja})\}, \quad P_{hav}(v) \geq P_{raja} \quad (15)$$

Pienillä sademäärän arvoilla muunnoksen suuruus riippuu kuvan L1 mukaisesti siis lineaarisesti havaitusta sademäärästä. Suurilla sademäärillä taas eksponenttifunktio vie muunnoksen mitätömän pieneksi. Kaikkein eniten muuttuvat suunnilleen 1 mm/vrk sademäärät. Näin ollen sadepäivien määrää muutetaan mallien ennustamalla tavalla kuitenkin tässä vaiheessa isommin peukaloimatta kokonaissademäärää.

Tämän vaiheen tuloksena saatiin laskettua muunnoksen ensimmäisen askel vuorokausisademäärille:

$$P^{(1)}(v) = P_{hav}(v) + \Delta P^{(1)} \quad (16)$$

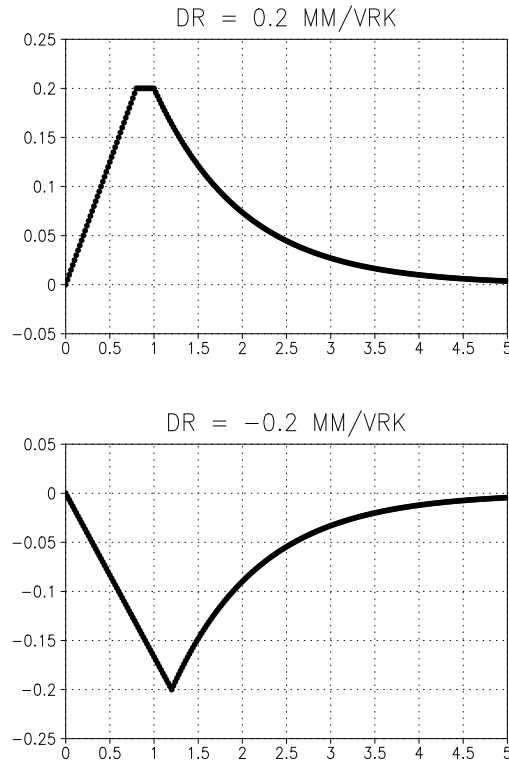
Vaihe 2: Sateen intensiteetti-indeksin kasvua vastaava muunnos.

Mallitulosten perusteella sateen intensiteetti-indeksin todettiin suurentuvan kaikkina kuukausina. Tämän huomioimiseksi korotettiin vuorokautisia sademääriä kaikkina niinä päivinä, joi-na sadetta vaiheen 1 tuloksena oli saatu yli 1 mm:

$$P^{(2)}(v) = P^{(1)}(v) + \alpha(P^{(1)}(v) - 1)^2 \quad (17)$$

missä $P^{(1)}(v)$ on vaiheen 1 perusteella saatu vuorokausisademäärä, joka on selvästi yhtä millimetriä suuremmille sadevuorokausille käytännössä sama kuin P_{hav} . Jotta indeksi muuttuisi mallien ennustamalla tavalla, kertoimen arvoksi asetetaan:

$$\alpha = \frac{SI_j SP_j \sum_{P_{hav}(v) \geq 1} P_{hav}(v) / SI_{1995} SP_{1995} - \sum_{P^{(1)}(v) \geq 1} P^{(1)}(v)}{\sum_{P^{(1)}(v) \geq 1} (P^{(1)}(v) - 1)^2} \quad (18)$$



Kuva L1. Vuorokautisen sademäärän lisäys/vähennys muunnoksen ensimmäisessä vaiheessa havaitun vuorokausisademäärän funktiona. Yläkuva: muunnostermi $\Delta P^{(1)}$ kaavojen (11)-(13) mukaan, kun sademäärän lisäyksen amplitudi on $DR = 0.2$ mm/vrk. Alakuva: kaavojen (14)-(15) mukainen $\Delta P^{(1)}$, kun vähennyksen amplitudi on $DR = -0.2$ mm/vrk.

Näin saatiin sadeindeksiä suurennettua mallien ennustamalla tavalla, korottamalla suuria sademääriä enemmän kuin pieniä. Aivan valtavien sademäärien muodostumisen estämiseksi sallittiin kuitenkin vuorokauden sademäärän kohoavan korkeintaan kaksinkertaiseksi verrattuna perusjakson vastaavan vuorokauden sademäärään. Käytännössä tätä leikkuria tarvittiin vain muutamana päivänä koko 30 vuoden jakson aikana.

Vaihe 3: Tunnittaisten sademäärien muuntaminen.

Tunnittaisten sademäärien muuntamisessa käytettiin Aaltosen ym. (2008) raportin kappaleessa 9.4 esitettyä menetelmää. Hyvin pitkälti sama filosofia oli käytössä myös jo vaiheen 2 vuorokausisademäärien muunnoksessa. Kasvaneet vuorokausisademäärät jaettiin vuorokauden tunnin kesken niin, että suuria sademääriä kasvatettiin enemmän kuin pieniä:

$$P^{(3)}(t) = P_{hav}(t) + \beta P_{hav}^2(t) \quad (19)$$

missä t viittaa aikaan tunnin tarkkuudella ja

$$\beta = \left(\frac{P^{(2)}(v)}{P_{hav}(v)} - 1 \right) \frac{\sum_{t=1}^{24} P_{hav}(t)}{\sum_{t=1}^{24} P_{hav}^2(t)} \quad (20)$$

Vaihe 4: Muunnettujen sademäärien sovittaminen vastaamaan keskimääräisten kuukausisademäärien muutosta.

Tässä viimeisessä vaiheessa laskettiin ensin vaiheen 3 sademääristä kuukausiarvot 30-vuotis-keskiarvoina ja sen jälkeen kerrottiin kaikki havaintoihin perustuvat tunnitaiset sademäärät korjauskertoimella. Näin saatiin “lopulliset” arvot tulevaisuuden ilmaston sademäärille:

$$P_{ske}(t) = \left(1 + \frac{\Delta\bar{P}}{100}\right) \frac{\bar{P}_{hav}}{\bar{P}^{(3)}} P^{(3)}(t) \quad (21)$$

missä $\Delta\bar{P}$ on 19 mallin keskiarvona saatu keskimääräisen sademäärän prosentuaalinen muutos. Tämän vaiheen tuloksena skenaariojaksojen 30-vuotiset keskimääräiset klimatologiset sademäärät muuttuvat täsmälleen mallien ennustamalla tavalla. Toisaalta sadepäivien lukumäärä ja sateen intensiteetti-indeksin muunnos eivät tämän jälkeen enää tarkkaan vastaa malliennustuksia.

L1.3 Sademäärän muunnosmenetelmän heikkouksista pienissä otoksissa

Muunnoksen ensimmäisen vaiheen kaavoja (11)-(15) johdettaessa on oletettu, että tarkasteltava havaintoaineisto on suuri. Tällaisesta aineistosta löytyy runsain määrin kohtuullisen lähellä yhtä millimetriä olevia vuorokautisia sademääriä, joita voidaan muokata niin, että tulevaisuuden ilmaston aikasarjaan tulee juuri se määrä yli yhden millin sadepäiviä, mitä ilmastomallitulosten perusteella kyseisenä kuukautena pitääkin. Näin muunnoksen kannalta keskeiselle P_{raja} -parametrille saadaan valittua tarkoituksenmukainen arvo.

Tilanne olisi oleellisesti hankalampi, mikäli aineisto on pieni. Tällöin voi käydä esimerkiksi niin, että kun sadepäivien lukumäärää olisi vähennettävä hieman, lähin 1 mm isompi vuorokautinen sademäärä aineistossa olisikin vaikkapa 1.9 mm. Tämä antaisi parametrille DR arvoksi -0.9 mm, jolloin kaavan (14) mukaan alle yhden millin vuorokausisademääriä tiputettaisiin jo lähes 50%:lla. Kun sademäärän vähennykset sitten jaetaan kullekin vuorokauden tunnille kaavan (19) avulla, tästä voi kehkeytyä ääritapauksissa jopa negatiivisia tunnitaisia sademääriä. Isoilla otoksilla tämänkaltaista ongelmaa ei esiinny. Sen tähden testivuosien sademäärien muunnos toteutettiin niin, että testivuoden säätiedot sijoitettiin ko. vuoden kohdalle osaksi 30-vuotista aikasarjaa. Tämä 30-vuotinen aikasarja muunnettiin kokonaisuutena uuteen ilmastoon, mutta tätä muunnostehtävää suoritettaessa ainoastaan testivuotta edustavat tiedot tallennettiin.

Liite 2: Ilmastosuureitten kuukausikeskiarvojen muutokset 30-vuotisesta aineistosta

Tässä raportissa esitetyillä algoritmeilla tuotettujen eri ilmastosuureitten muutokset tulevaan ilmastoon siirryttäessä kaikilla neljällä asemalla on esitetty taulukossa 3. Poikkeuksena tästä on tuulen suunta — sehän on esitetty asteina, joten siitä ei ole mielekäästä laskea aikakeskiarvoja. Tuulen suuntien jakaumasta esitetään sen sijaan frekvenssijakaumia kappaleessa 3.3.

Taulukko 3. Kuukauden keskilämpötilan ja tunnittaisten lämpötilojen keskihajonnan sekä suhteellisen kosteuden, tuulen nopeuden, kokonaissäteilyn, auringon sädetä vastaan kohtisuoralle pinnalle tulevan suoran säteilyn ja vaakasuoralle pinnalle saatavan hajasäteilyn sekä sademäärän muutosten kuukausikeskiarvot kaikilla neljällä asemalla siirryttäessä havaintojaksosta 1980–2009 vuosien 2030, 2050 ja 2100 tienoilla vallitsevaan A2-skenaariota vastaavaan ilmastoon. Tulokset perustuvat koko 30 vuoden jakson säätietoihin (luvut 2–3). Projisoitua suoraa säteilyä ei ole laskettu auringon paistaessa alemmalla kuin 5 asteen korkeudelta, mikä selittää taulukon 3(f) puuttuvat arvot pohjoisilla asemilla joulutammikuussa.

(a) Lämpötilan muutos (°C)

Kk	Vantaa			Jokioinen			Jyväskylä			Sodankylä		
	2030	2050	2100	2030	2050	2100	2030	2050	2100	2030	2050	2100
1	1.7	3.1	7.5	1.6	2.8	6.7	2.0	3.5	8.7	2.5	4.1	9.6
2	1.6	3.1	7.1	1.7	3.1	7.0	1.8	3.4	7.9	2.2	4.0	8.8
3	1.3	2.4	5.9	1.4	2.5	5.9	1.4	2.6	6.4	1.8	3.4	7.5
4	1.2	1.9	4.7	1.2	1.9	4.5	1.2	2.1	5.1	1.3	2.3	5.7
5	1.0	1.7	4.1	0.9	1.6	3.9	1.0	1.8	4.3	1.1	2.1	5.2
6	0.9	1.5	3.7	0.9	1.6	3.9	0.9	1.6	3.8	0.9	1.8	4.3
7	0.8	1.5	3.6	0.9	1.6	3.9	0.8	1.5	3.5	1.0	1.8	4.2
8	0.8	1.5	3.8	0.9	1.6	4.1	0.8	1.4	3.7	0.8	1.7	4.1
9	0.9	1.7	4.2	0.9	1.7	4.3	0.9	1.7	4.1	0.9	1.8	4.4
10	0.8	1.7	4.5	0.8	1.7	4.4	0.9	1.8	4.7	1.1	2.1	5.2
11	1.3	2.3	5.4	1.2	2.0	4.9	1.5	2.6	6.2	1.7	3.2	7.7
12	1.7	2.9	7.0	1.4	2.5	5.9	2.0	3.4	8.2	2.3	4.0	9.4
Vuosi	1.2	2.1	5.1	1.2	2.1	5.0	1.3	2.3	5.5	1.5	2.7	6.4

(b) Lämpötilojen keskihajonnan muutos (%)

Kk	Vantaa			Jokioinen			Jyväskylä			Sodankylä		
	2030	2050	2100	2030	2050	2100	2030	2050	2100	2030	2050	2100
1	-7.0	-13.5	-27.7	-9.7	-17.8	-31.4	-7.3	-13.9	-28.9	-7.1	-12.0	-28.4
2	-5.4	-8.6	-25.0	-8.8	-13.7	-32.0	-5.7	-8.5	-26.5	-5.7	-7.7	-22.9
3	-9.8	-14.7	-30.4	-12.2	-18.9	-34.5	-10.0	-15.5	-30.3	-9.0	-15.7	-27.7
4	-4.1	-6.2	-10.3	-6.9	-10.7	-16.4	-5.3	-8.3	-22.0	-8.4	-14.3	-26.9
5	0.0	1.7	-1.7	-1.0	-0.4	-0.7	0.0	3.2	1.3	-0.6	2.2	-2.8
6	0.9	-0.1	4.1	0.5	-1.5	4.4	-0.4	-2.1	0.0	-0.4	0.5	0.7
7	0.1	0.0	4.7	0.0	1.6	4.1	0.0	0.1	3.7	-1.5	-0.9	-1.9
8	-1.6	-1.1	-3.2	-2.6	-2.9	-6.7	-2.1	-2.3	-5.2	-2.6	-3.5	-5.0
9	-3.5	-3.4	-4.3	-2.9	-2.2	-2.6	-3.0	-3.6	-6.0	-2.7	-3.3	-10.3
10	-3.0	-4.6	-13.6	-3.4	-5.2	-13.3	-4.2	-6.7	-14.7	-10.8	-19.4	-25.9
11	-7.4	-13.9	-27.7	-6.2	-12.1	-24.4	-9.6	-18.2	-33.6	-10.1	-17.5	-36.4
12	-5.8	-10.7	-30.7	-5.6	-8.8	-28.4	-6.3	-10.2	-28.3	-6.2	-9.8	-28.5

(c) Suhteellisen kosteuden muutos (%-yks.)

Kk	Vantaa			Jokioinen			Jyväskylä			Sodankylä		
	2030	2050	2100	2030	2050	2100	2030	2050	2100	2030	2050	2100
1	1.0	2.2	4.7	1.0	1.9	3.9	1.6	2.9	6.3	2.3	3.6	8.0
2	0.9	2.5	5.0	1.0	2.2	4.4	1.5	3.3	6.8	2.1	3.8	7.8
3	0.4	1.1	2.8	0.4	1.0	2.0	0.7	2.2	5.3	1.7	3.4	6.9
4	1.0	1.0	2.5	1.1	0.8	2.2	0.6	0.9	2.6	0.6	0.6	2.4
5	-1.0	-1.0	0.8	-1.6	-1.5	0.0	-0.6	0.1	2.3	-0.7	1.2	2.2
6	-1.0	-0.3	-1.4	-1.0	-0.2	-0.9	-0.5	0.1	-0.5	0.9	1.5	1.5
7	-0.1	-0.5	-0.2	-0.1	-0.4	0.5	-0.6	-0.5	0.6	-1.5	-1.3	-1.1
8	-0.1	-0.5	-1.8	-0.4	-0.7	-1.4	-0.1	-0.4	-0.7	0.3	-0.2	0.0
9	-0.4	-0.6	-1.0	-0.3	-0.7	-0.8	-0.3	-0.1	0.5	0.2	0.6	1.2
10	0.3	0.5	0.8	0.3	0.3	0.6	0.7	1.3	2.4	1.2	2.6	4.8
11	0.2	1.3	3.0	0.4	1.1	2.2	1.1	2.2	4.3	1.6	2.9	6.1
12	1.1	2.1	4.8	0.8	1.4	3.5	1.5	2.7	5.7	1.9	3.3	7.6
Vuosi	0.2	0.6	1.7	0.1	0.4	1.4	0.5	1.2	3.0	0.9	1.8	3.9

(d) Tuulen nopeuden %-muutos

Kk	Vantaa			Jokioinen			Jyväskylä			Sodankylä		
	2030	2050	2100	2030	2050	2100	2030	2050	2100	2030	2050	2100
1	2.0	2.8	12.4	2.3	3.2	10.7	1.7	2.4	12.0	0.7	1.0	7.4
2	2.4	3.4	6.4	3.7	5.1	10.7	1.6	2.2	4.8	1.3	1.7	4.1
3	0.2	0.2	-0.1	1.1	1.5	3.3	-0.2	-0.3	-0.5	0.3	0.4	-0.2
4	0.2	0.2	2.2	0.1	0.2	1.7	-0.2	-0.2	3.5	-0.3	-0.4	-1.2
5	0.1	0.1	1.3	-0.6	-0.9	-1.0	-0.2	-0.3	0.6	0.3	0.4	-0.6
6	0.9	1.2	1.3	0.8	1.1	-0.5	-0.1	-0.2	-0.5	0.4	0.6	2.6
7	0.0	0.0	1.4	-0.1	-0.1	1.3	0.2	0.2	-1.3	-0.6	-0.8	0.0
8	-0.3	-0.4	2.6	-0.4	-0.5	2.4	-0.5	-0.7	1.2	0.3	0.4	1.2
9	1.5	2.1	1.7	1.4	1.9	1.3	1.3	1.8	0.4	-0.2	-0.3	0.7
10	0.7	1.0	3.4	0.5	0.7	4.1	0.4	0.6	2.8	0.5	0.7	2.0
11	2.1	2.9	3.7	1.8	2.4	3.4	1.6	2.3	3.6	2.1	2.9	8.6
12	0.9	1.3	5.6	0.4	0.6	4.0	1.1	1.5	4.3	0.5	0.7	4.9
Vuosi	0.9	1.3	3.6	0.9	1.3	3.5	0.6	0.8	2.7	0.4	0.6	2.3

(e) Kokonaissäteilyn %-muutos

Kk	Vantaa			Jokioinen			Jyväskylä			Sodankylä		
	2030	2050	2100	2030	2050	2100	2030	2050	2100	2030	2050	2100
1	-4.7	-9.5	-22.8	-4.2	-8.8	-18.9	-5.0	-9.5	-24.8	-3.8	-8.1	-18.8
2	-5.2	-8.6	-20.3	-5.2	-8.1	-18.9	-3.7	-7.6	-20.7	-3.1	-6.3	-14.7
3	-1.6	-5.3	-14.0	-2.1	-5.6	-13.1	-1.1	-5.2	-15.0	-1.3	-5.6	-14.5
4	-2.4	-3.1	-7.9	-2.0	-2.3	-6.6	-3.0	-4.1	-10.0	-3.0	-5.4	-15.0
5	0.4	-0.4	-1.7	0.9	0.0	-1.1	-0.4	-1.7	-3.2	-1.7	-4.1	-9.1
6	1.0	0.7	-0.1	0.7	0.0	-0.9	1.3	0.7	0.0	0.6	-0.7	-3.3
7	1.0	0.2	-1.1	1.0	0.0	-1.4	1.6	0.2	-0.8	2.0	0.4	0.4
8	-0.3	0.0	1.3	-0.4	0.2	0.6	-0.6	0.2	1.1	-0.7	-0.5	-1.4
9	2.1	1.7	5.1	2.0	2.4	5.7	1.1	0.8	3.8	-1.0	-2.6	-5.3
10	1.1	1.3	1.6	1.5	2.1	4.3	-0.4	-0.5	-4.8	-4.3	-7.9	-19.9
11	-2.6	-5.4	-13.1	-0.5	-2.4	-6.9	-4.9	-8.5	-20.5	-5.6	-10.4	-26.8
12	-5.6	-9.4	-21.8	-4.4	-7.0	-14.8	-7.0	-11.6	-26.3	-4.7	-7.9	-19.2
Vuosi	-0.1	-0.9	-2.8	0.0	-0.8	-2.5	-0.2	-1.3	-3.7	-0.7	-2.5	-6.7

(f) Projisoidun suoran säteilyn %-muutos

Kk	Vantaa			Jokioinen			Jyväskylä			Sodankylä		
	2030	2050	2100	2030	2050	2100	2030	2050	2100	2030	2050	2100
1	-13.1	-24.3	-50.2	-12.2	-23.4	-43.4	-13.8	-24.3	-54.3	-	-	-
2	-11.4	-18.3	-39.2	-11.5	-17.2	-36.6	-8.3	-15.9	-38.8	-8.5	-16.3	-33.8
3	-3.4	-10.8	-25.9	-4.5	-11.3	-24.2	-2.4	-10.5	-27.2	-3.2	-12.2	-28.3
4	-4.4	-5.8	-14.4	-3.7	-4.3	-12.3	-5.6	-7.8	-18.1	-6.3	-11.0	-27.8
5	0.6	-0.7	-2.9	1.6	-0.1	-2.0	-0.8	-3.1	-5.9	-3.8	-9.0	-19.4
6	1.9	1.3	-0.3	1.4	0.1	-1.6	2.4	1.4	0.0	1.3	-1.5	-6.8
7	1.7	0.3	-2.1	1.8	0.1	-2.6	2.9	0.3	-1.5	4.1	0.9	0.8
8	-0.6	0.1	2.5	-0.8	0.3	1.1	-1.2	0.5	2.2	-1.5	-1.2	-3.1
9	4.4	3.5	10.6	4.2	5.2	12.4	2.4	1.7	8.3	-2.5	-6.3	-12.4
10	2.8	3.3	3.9	3.9	5.5	11.3	-1.3	-1.6	-12.0	-10.9	-18.1	-38.7
11	-7.1	-14.1	-29.8	-1.9	-7.7	-19.4	-14.6	-22.6	-44.8	-17.8	-29.2	-59.3
12	-17.7	-27.7	-53.4	-15.8	-23.5	-42.8	-	-	-	-	-	-
Vuosi	-0.4	-2.2	-6.0	-0.2	-1.8	-5.2	-0.7	-3.0	-7.7	-1.9	-6.0	-14.4

(g) Hajasäteilyn %-muutos

Kk	Vantaa			Jokioinen			Jyväskylä			Sodankylä		
	2030	2050	2100	2030	2050	2100	2030	2050	2100	2030	2050	2100
1	-1.7	-4.3	-13.1	-1.3	-3.5	-10.0	-1.6	-3.9	-14.1	-1.0	-2.6	-8.7
2	-1.6	-3.1	-9.4	-1.6	-2.9	-8.9	-1.0	-2.6	-9.7	-0.8	-2.0	-6.2
3	-0.1	-0.8	-4.1	-0.3	-1.1	-4.3	-0.1	-0.8	-4.9	-0.1	-1.3	-5.3
4	0.0	0.0	-0.4	0.0	0.0	-0.3	-0.1	-0.1	-1.1	-0.1	-0.3	-3.3
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.6
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.2	-0.7
10	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.0	-0.1	-1.2	-1.3	-3.2	-11.1
11	-0.7	-2.0	-6.3	-0.1	-0.7	-2.7	-1.9	-3.9	-12.5	-1.8	-4.2	-15.6
12	-2.1	-4.2	-12.7	-1.2	-2.2	-6.6	-2.6	-5.4	-17.5	-3.0	-5.1	-13.2
Vuosi	-0.1	-0.3	-1.1	-0.1	-0.3	-0.9	-0.1	-0.3	-1.3	-0.1	-0.4	-1.6

(h) Sademäärän %-muutos

Kk	Vantaa			Jokioinen			Jyväskylä			Sodankylä		
	2030	2050	2100	2030	2050	2100	2030	2050	2100	2030	2050	2100
1	3.6	9.7	31.7	4.1	9.2	26.5	3.6	9.4	35.1	6.1	11.6	40.5
2	6.4	9.8	31.5	5.8	9.6	27.8	6.5	10.8	32.7	8.5	14.4	33.5
3	4.4	6.9	22.1	3.1	4.8	16.8	4.2	7.1	23.2	3.9	8.2	28.6
4	3.1	6.3	20.5	1.5	4.2	15.3	2.3	5.6	17.7	5.2	9.2	22.6
5	3.8	6.0	17.7	2.1	3.5	12.2	4.0	5.3	16.0	3.5	5.7	23.5
6	-1.2	3.6	10.3	-0.8	4.0	12.1	-0.6	3.9	13.2	-1.0	5.0	18.9
7	2.6	4.3	12.1	2.6	5.5	13.7	2.1	5.1	11.9	3.0	5.1	9.2
8	3.8	4.9	6.1	3.5	3.1	4.5	3.5	4.5	6.1	4.9	5.2	12.9
9	3.5	5.8	10.1	2.9	4.7	10.7	4.1	6.4	11.8	2.2	3.1	14.2
10	3.3	8.4	20.0	2.9	8.3	19.1	3.1	8.0	21.6	2.1	8.8	24.1
11	7.2	11.0	26.1	6.4	9.7	24.0	8.0	10.7	29.6	7.1	13.0	32.6
12	5.4	9.0	30.8	4.8	8.3	25.3	6.4	12.0	36.5	8.0	15.4	41.2
Vuosi	3.8	7.1	19.0	3.2	6.1	16.3	3.7	7.1	19.5	4.0	7.9	22.7

Liite 3: Ilmastosuureitten kuukausikeskiarvojen muutokset testivuosien säätietojen perusteella

Testivuosien sääaineistoihin (luvut 3–4) perustuvat ilmastosuureitten muutokset vuoden 2100 ilmastoon siirryttäessä on esitetty taulukossa 4. Lämpötilojen keskihajonnan ja kokonaissäteilyn muutokset ovat samoja kuin taulukossa 3, eikä niitä ole siksi tässä toistettu.

Taulukko 4. Ilmastosuureitten muutosten kuukausikeskiarvot, kun verrataan vuoden 2100 tienoilla vallitsevaa A2-skenaarion mukaista ilmastoa havaintoihin perustuviin testivuosiin (Vantaa v. 2007 ja Jokioinen v. 2004). Eri suureitten muutokset on merkitty seuraavin symbolein: ΔT ($^{\circ}\text{C}$) — lämpötila; ΔRH — suhteellinen kosteus (%-yksikköä); ΔV — tuulen nopeus (%); ΔR_{proj} (%) — koh-tisuoralle pinnalle saatava suora säteily; ΔR_{hj} (%) — hajasäteily; ΔP (%) — sademäärä.

Kk	Vantaa-2007						Jokioinen-2004					
	ΔT	ΔRH	ΔV	ΔR_{proj}	ΔR_{hj}	ΔP	ΔT	ΔRH	ΔV	ΔR_{proj}	ΔR_{haja}	ΔP
1	6.9	3.7	12.8	-40.7	-15.1	34.7	7.3	4.8	8.8	-42.4	-14.0	27.6
2	8.1	6.6	2.3	-34.6	-11.0	24.8	6.6	3.7	13.3	-38.5	-12.5	29.1
3	4.4	1.0	-0.2	-22.5	-5.6	16.7	5.7	1.7	4.8	-21.5	-4.3	13.1
4	4.6	2.7	2.7	-12.8	-0.5	37.3	4.3	2.6	0.8	-10.3	-0.3	7.3
5	4.1	0.7	0.9	-2.9	0.0	13.4	3.9	0.0	-0.9	-2.1	0.0	17.8
6	3.8	-1.5	1.0	-0.2	0.0	10.0	3.8	-0.9	0.8	-1.6	0.0	18.5
7	3.6	-0.2	0.9	-2.1	0.0	10.2	3.9	0.5	-1.3	-3.3	0.0	14.7
8	3.7	-1.9	1.4	2.3	0.1	2.1	4.1	-1.3	-1.7	1.1	0.0	2.3
9	4.2	-0.9	1.5	11.1	0.4	9.1	4.3	-0.6	5.3	14.7	0.2	9.7
10	4.4	0.7	3.3	4.2	0.2	30.1	4.4	0.4	-0.7	9.1	0.4	11.4
11	5.5	2.7	2.3	-26.2	-7.6	42.0	5.0	1.7	12.6	-17.0	-2.7	43.7
12	5.6	2.2	6.8	-51.0	-17.3	44.3	5.1	0.9	9.6	-34.1	-11.2	30.4
Vuosi	4.9	1.3	3.3	-5.7	-1.4	25.1	4.9	1.1	4.5	-5.6	-1.2	17.7

RAPORTTEJA — RAPPORTER — REPORTS

- 1986:
1. Savolainen, Anna Liisa et al., 1986. Radioaktiivisten aineiden kulkeutuminen Tshernobylin ydinvoimalaonnettomuuden aikana. Väliaikainen raportti. 39 s.
 2. Savolainen, Anna Liisa et al., 1986. Dispersion of radioactive release following the Chernobyl nuclear power plant accident. Interim report. 44 p.
 3. Ahti, Kari, 1986. Rakennussääpalvelukokeilu 1985-1986. Väliraportti Helsingin ympäristön talvikokeilusta 18.11.-13.3.1986. 26 s.
 4. Korhonen, Ossi, 1986. Pintatuulen vertailumittauksia lentoasemilla. 38 s.
- 1987:
1. Karppinen, Ari et al., 1987. Description and application of a system for calculating radiation doses due to long range transport of radioactive releases. 50 p.
 2. Venäläinen, Ari, 1987. Ilmastohavaintoihin perustuva arvio jyrshinturpeen tuotantoedellytyksistä Suomessa. 35 s.
 3. Kukkonen, Jaakko ja Savolainen, Anna Liisa, 1987. Myrkyllisten kaasujen päästöt ja leviäminen onnettomuustilanteissa. 172 s.
 4. Nordlund, Göran ja Rantakrans, Erkki, 1987. Matemaattisfysikaalisten ilmanlaadun arviointimallien luotettavuus. 29 s.
 5. Ahti, Kari, 1987. Rakennussäätutkimuksen loppuraportti. 45 s.
 6. Hakola, Hannele et al., 1987. Otsonin vaihteluista Suomessa yhden vuoden havaintoaineiston valossa. 64 s.
 7. Tammelin, Bengt ja Erkiö, Eero, 1987. Energialaskennan säätiedot – suomalainen testivuosi. 108 s.
- 1988:
1. Eerola, Kalle, 1988. Havaintojen merkityksestä numeerisessa säänennustuksessa. 36 s.
 2. Fredrikson, Liisa, 1988. Tunturisääprojekti 1986-1987. Loppuraportti. 31 s.
 3. Salmi, Timo and Joffre, Sylvain, 1988. Airborne pollutant measurements over the Baltic Sea: meteorological interpretation. 55 p.
 4. Hongisto, Marke, Wallin, Markku ja Kaila, Juhani, 1988. Rikkipäästöjen vähentämistoimenpiteiden taloudellisesti tehokas valinta. 80 s.
 5. Elomaa, Esko et al., 1988. Ilmatieteen laitoksen automaattisten merisääasemien käyttövarmuuden parantaminen. 55 s.
 6. Venäläinen, Ari ja Nordlund, Anneli, 1988. Kasvukauden ilmastotiedotteen sisältö ja käyttö. 63 s.
 7. Nieminen, Rauno, 1988. Numeeristen paine- ja korkeuskenttäennusteiden objektiivinen verifiointisysteemi sekä sen antamia tuloksia vuosilta 1985 ja 1986. 35 s.
- 1989:
1. Ilvessalo, Pekko, 1989. Yksittäisestä piipusta ilmaan pääsevien epäpuhtauksien suurimpien tuntipitoisuuksien arviointimenetelmä. 21 s.
- 1992:
1. Mhita, M.S. and Venäläinen, Ari, 1991. The variability of rainfall in Tanzania. 32 p.

2. Anttila, Pia (toim.), 1992. Rikki- ja typpilaskeuman kehitys Suomessa 1980-1990. 28 s.
- 1993: 1. Hongisto, Marke ja Valtanen Kalevi, 1993. Rikin ja typen yhdisteiden kaukokulkeutumismallin kehittäminen HIRLAM-sääennustemallin yhteyteen. 49 s.
2. Karlsson, Vuokko, 1993. Kansalliset rikkidioksidin analyysivertailut 1979 - 1991. 27 s.
- 1994: 1. Komulainen, Marja-Leena, 1995. Myrsky Itämerellä 28.9.1994. Säätilan kehitys Pohjois-Itämerellä M/S Estonian onnettomuusyönä. 42 s.
2. Komulainen, Marja-Leena, 1995. The Baltic Sea Storm on 28.9.1994. An investigation into the weather situation which developed in the northern Baltic at the time of the accident to m/s Estonia. 42 p.
- 1995: 1. Aurela, Mika, 1995. Mikrometeorologiset vuomittausmenetelmät - sovelluksena otsonin mittaaminen suoralla menetelmällä. 88 s.
2. Valkonen, Esko, Mäkelä, Kari ja Rantakrans, Erkki, 1995. Liikenteen päästöjen leviäminen katukuilussa - AIG-mallin soveltuvuus maamme oloihin. 25 s.
3. Virkkula, Aki, Lättilä, Heikki ja Koskinen, Timo, 1995. Otsonin maanpintapitoisuuden mittaaminen UV-säteilyn absorptiolla: DOAS-menetelmän vertailu suljettua näytteenottotilaa käyttävään menetelmään. 29 s.
4. Bremer, Pia, Ilvessalo, Pekko, Pohjola, Veijo, Saari, Helena ja Valtanen, Kalevi, 1995. Ilmanlaatuennusteiden ja -indeksin kehittäminen Helsingin Käpylässä suoritettujen mittausten perusteella. 81 s.
- 1996: 1. Saari, Helena, Salmi, Timo ja Kartastenpää, Raimo, 1996. Taajamien ilmanlaatu suhteessa uusiin ohjearvoihin. 98 s.
- 1997: 1. Solantie, Reijo, 1997. Keväthallojen alueellisista piirteistä ja vähän talvipakkastenkin. 28 s.
- 1998: 1. Paatero, Jussi, Hatakka, Juha and Viisanen, Yrjö, 1998. Concurrent measurements of airborne radon-222, lead-210 and beryllium-7 at the Pallas-Sodankylä GAW station, Northern Finland. 26 p.
2. Venäläinen, Ari ja Helminen, Jaakko, 1998. Maanteiden talvikunnossapidon sääindeksi. 47 s.
3. Kallio, Esa, Koskinen, Hannu ja Mälkki, Anssi, 1998. VII Suomen avaruustutkijoiden COSPAR-kokous, Tiivistelmät. 40 s.
4. Koskinen, H. and Pulkkinen, T., 1998. State of the art of space weather modelling and proposed ESA strategy. 66 p.
5. Venäläinen, Ari ja Tuomenvirta Heikki, 1998. Arvio ilmaston läm- penemisen vaikutuksesta teiden talvikunnossapidon kustannuksiin. 19 s.
- 1999: 1. Mälkki, Anssi, 1999. Near earth electron environment modelling tool user/software requirements document. 43 p.
2. Pulkkinen, Antti, 1999. Geomagneettisesti indusoidut virrat Suomen maakaasuverkostossa. 46 s.
3. Venäläinen, Ari, 1999. Talven lämpötilan ja maanteiden suolauksen välinen riippuvuus Suomessa. 16 s.

- 4 Koskinen, H., Eliasson, L., Holback, B., Andersson, L., Eriksson, A., Mälkki, A., Nordberg, O., Pulkkinen, T., Viljanen, A., Wahlund, J.-E., Wu, J.-G., 1999. Space weather and interactions with spacecraft : space final report. 191 p.
- 2000:
- 1 Solantie, Reijo ja Drebs, Achim, 2000. Kauden 1961 - 1990 lämpöoloista kasvukautena alustan vaikutus huomioiden, 38 s.
- 2 Pulkkinen, Antti, Viljanen, Ari, Pirjola, Risto, and Bear working group, 2000. Large geomagnetically induced currents in the Finnish high-voltage power system. 99 p.
- 3 Solantie, R. ja Uusitalo, K., 2000. Patoturvallisuuden mitoitussadannat: Suomen suurimpien 1, 5 ja 14 vrk:n piste- ja aluesadantojen analysointi vuodet 1959 - 1998 kattavasta aineistosta. 77 s.
- 4 Tuomenvirta, Heikki, Uusitalo, Kimmo, Vehviläinen, Bertel, Carter, Timothy, 2000. Ilmastonmuutos, mitoitussadanta ja patoturvallisuus: arvio sadannan ja sen ääriarvojen sekä lämpötilan muutoksista Suomessa vuoteen 2100. 65 s.
- 5 Viljanen, Ari, Pirjola, Risto and Tuomi, Tapio, 2000. Abstracts of the URSI XXV national convention on radio science. 108 p.
- 6 Solantie, Reijo ja Drebs, Achim, 2000. Keskimääräinen vuoden ylin ja alin lämpötila Suomessa 1961 - 90. 31 s.
- 7 Korhonen, Kimmo, 2000. Geomagneettiset mallit ja IGRF-appletti. 85 s.
- 2001:
- 1 Koskinen, H., Tanskanen, E., Pirjola, R., Pulkkinen, A., Dyer, C., Rodgers, D., Cannon, P., Mandeville, J.-C. and Boscher, D., 2001. Space weather effects catalogue. 41 p.
- 2 Koskinen, H., Tanskanen, E., Pirjola, R., Pulkkinen, A., Dyer, C., Rodgers, D., Cannon, P., Mandeville, J.-C. and Boscher, D., 2001. Rationale for a european space weather programme. 53 p.
- 3 Paatero, J., Valkama, I., Makkonen, U., Laurén, M., Salminen, K., Raittila, J. and Viisanen, Y., 2001. Inorganic components of the ground-level air and meteorological parameters at Hyytiälä, Finland during the BIOFOR project 1998-1999. 48 p.
- 4 Solantie, Reijo, Drebs, Achim, 2001. Maps of daily and monthly minimum temperatures in Finland for June, July, and August 1961-1990, considering the effect of the underlying surface. 28 p.
- 5 Sahlgren, Vesa, 2001. Tuulikentän alueellisesta vaihtelusta Längelmävesi-Roine - järviolueella. 33 s.
- 6 Tammelin, Bengt, Heimo, Alain, Leroy, Michel, Rast, Jacques and Sääntti, Kristiina, 2001. Meteorological measurements under icing conditions : EUMETNET SWS II project. 52 p.
- 2002:
- 1 Solantie, Reijo, Drebs, Achim, Kaukoranta, Juho-Pekka, 2002. Lämpötiloja eri vuodenaikoina ja eri maastotyypeissä Alajärven Möksyssä. 57 s.
- 2 Tammelin, Bengt, Forsius, John, Jylhä, Kirsti, Järvinen, Pekka, Koskela, Jaakko, Tuomenvirta, Heikki, Turunen, Merja A., Vehviläinen, Bertel, Venäläinen, Ari, 2002. Ilmastonmuutoksen vaikutuksia energiantuotantoon ja lämmitysenergian tarpeeseen. 121 s.
- 2003:
1. Vajda, Andrea and Venäläinen, Ari, 2003. Small-scale spatial variation of climate in northern Finland. 34 p.
2. Solantie, Reijo, 2003. On definition of ecoclimatic zones in Finland. 44 p.

3. Pulkkinen, T.I., 2003. Chapman conference on physics and modelling of the inner magnetosphere Helsinki, Finland, August 25 -29, 2003. Book of abstracts. 110 p.
 4. Pulkkinen, T. I., 2003. Chapman conference on physics and modelling of the inner magnetosphere Helsinki, Finland, August 25 -29, 2003. Conference program. 16 p.
 5. Merikallio, Sini, 2003. Available solar energy on the dusty Martian atmosphere and surface. 84 p.
 6. Solantie, Reijo, 2003. Regular diurnal temperature variation in the Southern and Middle boreal zones in Finland in relation to the production of sensible heat. 63 p.
- 2004:
1. Solantie, Reijo, Drebs, Achim and Kaukoranta, Juho-Pekka, 2004. Regular diurnal temperature variation in various landtypes in the Möksy experimental field in summer 2002, in relation to the production of sensible heat. 69 p.
 2. Toivanen, Petri, Janhunen, Pekka and Koskinen, Hannu, 2004. Magnetospheric propulsion (eMPii). Final report issue 1.3. 78 p.
 3. Tammelinn, Bengt et al., 2004. Improvements of severe weather measurements and sensors – EUMETNET SWS II project. 101 p.
 4. Nevanlinna, Heikki, 2004. Auringon aktiivisuus ja maapallon lämpötilan vaihtelut 1856 - 2003. 43 s.
 5. Ganushkina, Natalia and Pulkkinen, Tuija, 2004. Substorms-7: Proceedings of the 7th International Conference on Substorms. 235 p.
 6. Venäläinen, Ari, Sarkkula, Seppo, Wiljander, Mats, Heikkinen, Jyrki, Ervasto, Erkki, Poussu, Teemu ja Storås, Roger, 2004. Espoon kaupungin talvikunnossapidon sääindeksi. 17 s.
 7. Paatero, Jussi and Holmen, Kim (eds.), 2004. The First Ny-Ålesund - Pallas-Sodankylä atmospheric research workshop, Pallas, Finland 1 - 3 March 2004 - Extended abstracts. 61 p.
 8. Holopainen, Jari, 2004. Turun varhainen ilmastollinen havaintosarja. 59 s.
- 2005:
1. Ruuhela, Reija, Ruotsalainen, Johanna, Kangas, Markku, Aschan, Carita, Rajamäki, Erkki, Hirvonen, Mikko ja Mannelin, Tarmo, 2005. Kelimallin kehittäminen talvijalankulun turvallisuuden parantamiseksi. 47 s.
 2. Laurila, Tuomas, Lohila, Annalea, Tuovinen, Juha-Pekka, Hatakka, Juha, Aurela, Mika, Thum, Tea, Walden, Jari, Kuronen, Pirjo, Talka, Markus, Pesonen, Risto, Pihlatie, Mari, Rinne, Janne, Vesala, Timo, Ettala, Matti, 2005. Kaatopaikkojen kaasupäästöjen ja haihdunnan mikrometeorologisten mittausmenetelmien kehittäminen (MIKROMETKAA). Tekesin Streams –ohjelman hankkeen loppuraportti. 34 s. (Ei julkaistu – Not published)
 3. Siili, Tero, Huttunen, Emilia, Koskinen, Hannu ja Toivanen, Petri (toim.), 2005. Kymmenes Suomen avaruustutkijoiden kokous (FinCospar) Kokousjulkaisu. 57 s.
 4. Solantie, Reijo and Pirinen, Pentti, 2005. Diurnal temperature variation in inversion situations. 34 s.
 5. Venäläinen, Ari, Tuomenvirta, Heikki, Pirinen, Pentti and Drebs, Achim, 2005. A basic Finnish climate data set 1961 – 2000 – description and illustrations. 24 p.

6. Tammelin, Bengt, Säntti, Kristiina, Dobeck, Hartwig, Durstewich, Michel, Ganander, Hans, Kury, Georg, Laakso, Timo, Peltola, Esa, Ronsten, Göran, 2005. Wind turbines in icing environment: improvement of tools for siting, certification and operation – NEW ICETOOLS. 127 p.
- 2006:
1. Mälkki, Anssi, Kauristie, Kirsti and Viljanen Ari, 2006. Auroras Now! Final Report, Volume I. 73 p.
 2. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2006. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2003. 47 p.
 3. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2006. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2004. 47 p.
 4. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2006. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2005. 49 p.
 5. Viljanen, A. (toim.), 2006. Sähkömagnetiikka 2006. Tiivistelmät – Abstracts. 30 s.
 6. Tuomi, Tapio J. & Mäkelä, Antti, 2006. Salamahavainnot 2006 - Lightning observations in Finland, 2006. 39 p.
 7. Merikallio, Sini, 2006. Preliminary report of the analysis and visualisation software for SMART-1 SPEDE and EPDP instruments. 70 p.
 8. Solantie, Reijo, Pirinen, Pentti, 2006. Orografian huomioiminen loka- huhtikuun sademäärien alueellisissa analyseissä. 34 s.
 9. Ruosteenoja, Kimmo, Jylhä, Kirsti, Räisänen, Petri, 2006. Climate projections for the Nordic CE project – an analysis of an extended set of global regional climate model runs. 28 p.
 10. Merikallio, Sini, 2006. Analysis and visualisation software for DEMETER Langmuir Probe instrument. 31 p.
- 2007:
1. Solantie, Reijo, Järvenoja, Simo, Pirinen, Pentti, 2007. Keskimääräisten kuukauden minimilämpötilojen alueellinen jakauma kautena 1992 – 2005 Suomessa sekä muutos kaudesta 1961 – 1990. 59 s.
 2. Pulkkinen, Tuija, Hari, Ari-Matti, Haukka, Harri, Leinonen, Jussi, Toivanen, Petri, Koskinen, Hannu, André, Mats, Balasis, Georgios, Boscher, Daniel, Dandouras, Iannis, Grande, Mael, De Keyser, John, Glassmeier, Karl-Heinz, Hapgood, Mike, Horne, Richard, Ivchenko, Nikolay, Santolik, Ondrej, Torkar, Klaus, Trotignon, Jean Gabriel, Vennerstrøm, Susanne, 2007. Waves and acceleration of relativistic particles (WARP). 36 p.
 3. Harri, A-M., Leinonen, J., Merikallio, S., Paton, M., Haukka, H., Polkko, J., Linkin, V., Lipatov, V., Pichkadze, K., Polyakov, A., Uspensky, M., Vasquez, L., Guerrero, H., Crisp, D., Haberle, R., Calcutt, S., Wilson, C., Taylor, P., Lange, C., Daly, M., Richter, L., Jaumann, R., Pommereau, J-P., Forget, F., Lognonne, Ph., Zarnecki, J., 2007. MetNet – In situ observational network and orbital platform to investigate the Martian environment. 35 p.
 4. Venäläinen, Ari, Saku, Seppo, Kilpeläinen, Tiina, Jylhä, Kirsti, Tuomenvirta, Heikki, Vajda, Andrea, Räisänen, Jouni, Ruosteenoja, Kimmo, 2007. Sään ääri-ilmiöistä Suomessa. 81 s.
 5. Tuomi, Tapio J. & Mäkelä, Antti, 2007. Salamahavainnot 2007 - Lightning observations in Finland, 2007. 47 p.
 6. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2007. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2006. 49 p.

- 2008:
1. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2008. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2007. 49 p.
 2. Verronen, Pekka T. (ed), 2008. 1st international HEPPA workshop 2008, Book of abstracts. 81 p.
 3. Gregow, Hilppa, Venäläinen, Ari, Laine, Mikko, Niinimäki, Niina, Seitola, Teija, Tuomenvirta, Heikki, Jylhä, Kirsti, Tuomi, Tapio ja Mäkelä, Antti, 2008. Vaaraa aiheuttavista sääilmiöistä Suomen muuttuvassa ilmastossa. 99 s.
 4. Tuomi, Tapio J. & Mäkelä, Antti, 2008. Salamahavainnot 2008 – Lightning observations in Finland, 2008. 49 p.
 5. Heino, Raino and Tolonen-Kivimäki, Outi (eds), 2008. Finnish national report on systematic observations for climate – 2008. 27 p.
 6. Paatero, Jussi et al., 2008. Effects of Kola air pollution on the environment in the western part of the Kola peninsula and Finnish Lapland : final report. 26 p.
- 2009:
1. Nevanlinna, H., 2009. Geomagnetismin ABC-kirja. 204 s.
 2. Nevanlinna, H. (toim.), 2009. Ilmatieteen laitos 170 vuotta, 1838 - 2008. 69 s.
 3. Nevanlinna, Heikki, 2009. Revontulihavainnot Suomessa 1748 – 2009. 88 s.
 4. Jylhä, K., Ruosteenoja, K., Räisänen, J., Venäläinen, A., Tuomenvirta, H., Ruokolainen, L., Saku, S. ja Seitola, T., 2009. Arvioita Suomen muuttuvasta ilmastosta sopeutumistutkimuksia varten. ACCLIM-hankkeen raportti 2009. 102 p.
 5. Mäkelä, Antti & Tuomi, Tapio, J., 2009. Salamahavainnot 2009 – Lightning observations in Finland, 2009. 51 p.
 6. Verronen, Pekka (ed.), 2009. 5th International Atmospheric Limb Conference and Workshop : Book of abstracts. 92 p.
 7. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2009. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2008. 48 p.
 8. Kersalo, Juha and Pirinen, Pentti (eds), 2009. Suomen maakuntien ilmasto. 185 s.
- 2010:
1. Rauhala, Jenni & Mäntyniemi, Päivi, 2010. Luonnononnettomuuksien vaikutus ja niihin vaikuttaminen. (valmisteilla).
 2. Pilli-Sihvola, K. Löwendahl, E., Ollikainen, M., van Oort, B., Rummukainen, M. & Tuomenvirta, H., 2010. Survey on the use of climate scenarios and climate change research information in decision making in Finland, Sweden and Norway. Report for the project Climate change adaption in Norway, Sweden and Finland – do research, policy and practice meet? (CAREPol). 57 p.
 3. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2010. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2009. 48 p.
 4. Luomaranta, A., Haapala, J., Gregow, H., Ruosteenoja, K., Jylhä, K. and Laaksonen, A. 2010. Itämeren jääpeitteen muutokset vuoteen 2050 mennessä. 23 s.
 5. Mäkelä, Antti, 2010. Salamahavainnot 2010 – Lightning observations in Finland, 2010. 50 p.
- 2011:
1. Saku, Seppo; Solantie, Reijo, Jylhä, Kirsti, Venäläinen, Ari, Valta, Hannu, 2011. Ääriämpötilojen alueellinen vaihtelu Suomessa. 92 p.

2. Pajunpää, K. and Nevanlinna, H. (eds), 2011. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2010. 49 p.
 3. Virta, Hanna et al., 2011. Ilmastonmuutoksen ääri-ilmiöihin liittyvän riskienhallinnan kustannushyötyanalyysi osana julkista päätöksentekoa (IRTORISKI). 97 s.
 4. Nevanlinna, H. 2011. Magneettiset havainnot Helsingin magneettis-meteorologisessa observatoriossa, 1844-1910. 54 s.
 5. Gregow, Hilppa, Ruosteenoja, Kimmo, Juga, Ilkka, Näsman, Sigbritt, Mäkelä, Miika, Laapas, Mikko, Jylhä, Kirsti, 2011. Lumettoman maan routaolojen mallintaminen ja ennustettavuus muuttuvassa ilmastossa. 45 s.
 6. Jylhä, Kirsti, Kalamees, Targo, Tietäväinen, Hanna, Ruosteenoja, Kimmo, Jokisalo, Juha, Hyvönen, Reijo, Ilomets, Simo, Saku, Seppo, Hutila, Asko, 2011. Rakennusten energialaskennan testivuosi 2012 ja arviot ilmastonmuutoksen vaikutuksista. 110 s.
 7. Mäkelä, Antti, 2011. Salamahavainnot 2011 – Lightning observations in Finland, 2011.
 8. Riihelä. Aku, Lahtinen, Panu, Hakala, Teemu, 2011. Radiation, snow characteristics and albedo at Summit (RASCALS) expedition report. 48 p.
 9. Vajda, A. et al., 2011. Probabilities of adverse weather affecting transport in Europe : climatology and scenarios up to the 2050s. 85 p.
 10. Lehto, J., Paatero, J., Koivula, R., Solin, O., Ikäheimonen, T.K., Kekki, T. & Lahtinen, M. (toim.), 2011. Marie Curie symposium 8.-9.12.2011 Helsingissä : Tiivistelmät. 75 s.
- 2012:
1. Pirinen, P., Simola, H., Aalto, J., Kaukoranta, J-P., Karlsson, P., Ruuhela, R., 2012. Tilastoja Suomen ilmastosta 1981 – 2010, 83 s.
 2. Harri, A-M., Schmidt, W., Romero, P., Vázquez, L., Barderas, G., Kemppinen, O., Aguirre, C., Vázquez-Poletti, J. L., Llorente, I. M., Haukka, H. and Paton, M., 2012, Phobos eclipse detection on Mars : theory and Practice. 35p.
 3. Nevanlinna, H., 2012. Auringon aktiivisuus ja ilmastonmuutos. 41 s.
 4. Pajunpää, K., Häkkinen, L., (eds), 2012. Nurmijärvi Geophysical Observatory : Magnetic results 2011. 51 p.
- 2013:
1. Ruosteenoja, K., Jylhä, K., Mäkelä, H., Hyvönen, R., Pirinen, P., Lehtonen, I., 2013. Rakennusfysiikan testivuosien sääaineistot havaitussa ja arvioidussa tulevaisuuden ilmastossa : REFI-B-hankkeen tuloksia. 48 s.

Ilmatieteen laitos
Erik Palménin aukio 1, Helsinki
tel. (09) 19 291
www.fmi.fi

ILMATIETEEN LAITOS, RAPORTTEJA 2013:1
ISBN 978-951-697-779-2 (NID.)
ISBN 978-951-697-780-8 (PDF)
ISSN 0782-6079

Unigrafia
Helsinki